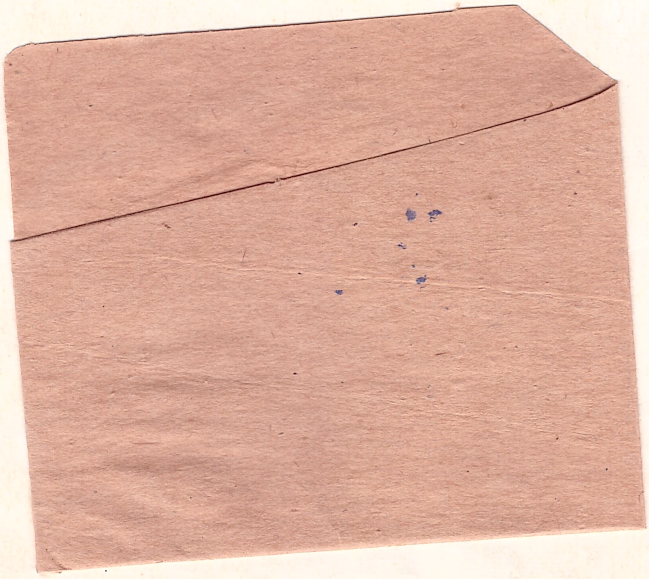
621.395
Б94

В. Е. Бухвинер

УПРАВЛЯЕМОЕ КОМПАНДИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ



621.395
Б94

В. Е. Бухвинер

УПРАВЛЯЕМОЕ КОМПАНДИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

069391

621.395

ПЕРЕВІРЕНО

МОСКВА «СВЯЗЬ» 1978.

32.884.1
Б94
УДК 621.395.44:621.395.722

Бухвинер В. Е.
Б94 Управляемое компандирование звуковых сигналов.— М.: Связь, 1978.— 208 с., ил.

Рассматриваются методы и техника радиопередачи звуковых сигналов на коммерческих и специальных линиях связи, в радиовещании и автоматизированных человеко-машинных системах. Анализируются отечественные и зарубежные модемы с управляемым компандированием, приводятся результаты их испытаний и оценивается эффективность компандирования в различных условиях связи. Показаны новые технические возможности повышения помехоустойчивости радиотелефонной связи и радиовещания, применения радиокомпандеров, а также способы контроля качества связи.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников в области разработки и эксплуатации систем связи и АСУ.

32.884.1

Б 30405—004 27—78
045(01)—78

6Ф2

© Издательство «Связь», 1978 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена анализу методов радиотелефонной связи, передаче звуковых сигналов в радиосвязи, вещании и автоматизированных системах управления с применением управляемого амплитудного компандирования сигналов и синтезу соответствующих модемов. В книге обобщается отечественный и зарубежный опыт разработки радиотелефонных систем связи, обеспечивающих объединение междугородных телефонных сетей с линиями межконтинентальной коммерческой радиосвязи и каналами подвижной радиосвязи.

Анализируются отечественные и зарубежные сведения по проектированию аналоговых систем передачи речевых сигналов с амплитудным компандированием, а также рассматриваются перспективные модемы с управляемым компандированием речи. Приводятся соответствующие рекомендации МККР по проектированию модемов типа «Линкомпекс» для фиксированных и подвижных служб радиосвязи.

Иллюстрируются функциональные схемы современных радиотелефонных трактов и приводятся технические характеристики этих трактов. Описывается новая отечественная аппаратура радиотелефонного канала АРКА, совместимая с аппаратурой «Линкомпекс».

Рассматриваются функциональные узлы радиотелефонных модемов, формулируются методы и приводятся примеры расчета основных параметров этих узлов (компандеров, модемов управления, эхо-заградителей, вызывных устройств и т. п.).

Разрабатывается методика и иллюстрируются результаты экспериментов по испытаниям радиотелефонных модемов и приводятся соображения по оценке качества радиотелефонной связи. Изложены сведения о применении метода управляемого компандирования в радиовещании.

Книга базируется на оригинальных материалах автора с привлечением соответствующих отечественных и зарубежных публикаций, патентных материалов и документов МККР.

Формулируются рекомендации по оптимизации режимов работы радиокомпандеров, по расчету основных элементов радиотелефонного тракта и разрабатываются новые методы повышения помехоустойчивости радиоприема звуковых сигналов.

До настоящего времени материалы, посвященные разработке и применению радиотелефонных модемов с компандированием, не публиковались в виде монографии ни в СССР, ни за рубежом.

Книга написана по материалам разработки отечественного радиокомпандера, инициаторами которой были В. А. Шамшин и Е. Е. Добровольский. Автор искренне благодарен им за помощь и поддержку в работе. При подготовке рукописи высказали полезные советы и критические замечания Н. В. Бандура, А. А. Пирогов, В. Г. Ходатай и Д. В. Шафер, которым автор выражает свою признательность.

Автор также благодарен коллегам по работе, публикации которых отмечены ссылками в библиографии.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Значение радио как всемирной службы информации пророчески подчеркнул В. И. Ленин, назвав радио газетой без бумаги и расстояний.

Современные системы радиосвязи и радиовещания органически входят в Единую автоматизированную сеть страны, не знают границ и позволяют мобильно организовать передачу — прием речевых сигналов между любыми пунктами Земли и за ее пределами.

Речевой сигнал издавна обеспечивает общение людей по телефонным сетям, по магистральным и областным радиоканалам, по системе связи с подвижными объектами, а в последнее время становится и средством человеко-машинного общения в кибернетических системах.

Речевой сигнал, наряду с другими звуковыми сигналами (музыка, репортажи и т. п.), является основным сигналом в системах массовой информации (радиовещание, телевидение). Поэтому развитие и совершенствование методов передачи речевого сигнала является одной из важных и актуальных проблем отрасли связи.

Производится все ускоряющееся внедрение новых технических средств связи, освоение новых диапазонов частот, увеличение объемов и разветвление потоков передаваемой информации, возрастают требования к качеству связи. Сокращение сроков внедрения новых идей в технике связи ярко иллюстрируется данными, приведенными в статье С. П. Трапезникова «Ленинизм и современная научно-техническая революция» («Вопросы философии», № 4, 1970).

Наименование нового направления	Дата разработки	Дата внедрения	Период внедрения (годы)	Наименование нового направления	Дата разработки	Дата внедрения	Период внедрения (годы)
Телефонная связь	1820	1876	56	Телевидение	1922	1934	12
Радиосвязь	1867	1902	35	Транзистор	1948	1953	5
Радиолокация	1925	1940	15	Интегральные схемы	1958	1961	3

Следовательно, одной из важнейших задач ускорения внедрения новой технологии в отрасли связи являются анализ перспективных направлений развития и синтез новых технических решений в области передачи речи по каналам связи.

Применительно к передаче речевых сообщений прогрессивным технологическим методом является метод управляемого компандирования, который позволяет улучшить согласование характеристик сигнала с параметрами канала связи, за счет чего существенно повышается качество радиосвязи и радиовещания, а также существенно расширяются возможности автоматизированных систем информационного обслуживания. Наиболее актуально внедрение метода управляемого компандирования в каналах с переменными параметрами, к числу которых, в первую очередь, относится коротковолновый радиоканал.

Наряду с освоением новых диапазонов частот, внедрением новейших космических и наземных средств связи коротковолновая связь остается актуальной, так как этот вид малоканальной связи является высокомобильным и экономичным.

Однако условия распространения в диапазоне коротких волн нестабильны во времени, поскольку зависят от солнечной радиации, определяющей степень ионизации отражающих слоев ионосферы. На высоте 100—300 км ионосферные слои отражают излученные передатчиком радиоволны в пункт приема сигнала. Рабочие частоты, отражающие и поглощающие свойства ионосферы, определяются как активностью, так и положением Солнца относительно радиотрассы. Поэтому наблюдаются суточные, сезонные и циклические изменения качества радиосвязи на каждой радиолинии.

Многолучевой характер распространения коротких волн и ограниченность спектра частот этого перегруженного диапазона, в котором работают на повторяющихся частотах сотни тысяч радиостанций, делают коротковолновую связь ненадежной. Поэтому вся история коротковолновой техники является историей борьбы за помехоустойчивость. Результаты, достигнутые в этой борьбе, используются при решении задач электросвязи в самых различных диапазонах частот и поэтому имеют общетехническое значение.

Для получения общетехнических рекомендаций необходим системный подход к анализу проблемы. Системный подход опирается на диалектический закон взаимосвязи и взаимообусловленности явлений, требует анализировать метод или объект не только как самостоятельную систему, но как подсистему некоторой укрупненной системы. С одной стороны, такое направление исследования позволяет рассматривать управляемый компандер как часть радиоканала и, следовательно, поставить задачи совершенствования полной системы, по-новому решить такие традиционные вопросы, как повышение качества связи, защита радиоканалов от самовозбуждения, от эхо-сигналов, повышение помехоустойчивости вызовов и т. д. С другой стороны, системный подход

позволяет усовершенствовать и сам управляемый компандер, рекомендованный МККР в качестве отдельного функционального элемента радиоканала, оценить его роль и возможные улучшения, достигаемые с помощью радиокомпандера, в радиосвязи, радиовещании и АСУ.

Системный подход к решению проблемы требует анализа максимального числа связей не только внутренних, но и внешних. Соответственно рассматриваются особенности разнесенного радиоприема и ретрансляции компандерных сигналов, а также измерения в трактах с управляемым компандированием.

Анализ стольких специфических задач позволил выявить область применения радиокомпандеров, указать новые возможности использования метода в перспективных системах связи, вещания и АСУ.

Краткое рассмотрение основных методов компрессии речи (амплитудной, частотной и временно́й) и их классификация показывают, что амплитудная компрессия позволяет повысить эффективность любых систем речевой связи, в которых абонент удален от пункта передачи сигналов и любых систем радиовещания, причем во всех случаях эффективность систем повышается за счет повышения помехоустойчивости.

Помехоустойчивость систем, в которые вводится управляемый компандер, повышается по следующим причинам:

— компрессия звуковых сигналов сокращает их естественный динамический диапазон;

— сжатие динамического диапазона передаваемых сигналов увеличивает эквивалентную мощность передатчика;

— передача звуковых сигналов с уровнем, близким к постоянному, позволяет компенсировать замирания радиосигналов на приеме;

— передача специальных управляющих сигналов, несущих информацию об изменениях звуковой огибающей, позволяет подавить шумы в паузах;

— передача управляющих сигналов помехоустойчивым методом обеспечивает уменьшение искажений звуковой огибающей;

— подавление эхо-сигналов и помех дифференциальных систем, повышение надежности вызова.

Достоинства нового метода передачи звуковых сигналов доказаны в процессе испытаний, выполненных в ряде стран и зафиксированных в документах МККР.

Указанные преимущества нового метода передачи — приема телефонных и вещательных сигналов привели к тому, что появились многочисленные модемы с управляемым компандированием, различные модификации которых разработаны в последнее десятилетие во всех промышленно-развитых странах. Радиокомпандеры нашли широкое применение в межконтинентальной радиосвязи, и поэтому нормирование их параметров стало необходимым в международном масштабе.

Советский Союз внес вклад в разработанную МККР Рекомендацию № 455, которая регламентирует совместимость национальных радиотелефонных систем и электрические характеристики радиокомпандеров.

Анализ методов и техники передачи звуковых сигналов и систем с управляемым компандированием позволил синтезировать ряд новых технических решений, которые использованы при разработке отечественной радиотелефонной аппаратуры.

Эти и другие решения технических задач, направленные на совершенствование методов передачи — приема звуковых сигналов, представлены в виде структурных схем, поскольку функциональные схемы компандеров модемов телефонной связи достаточно разработаны, а принципиальные схемы быстро изменяются с прогрессом элементной базы. При анализе возможностей метода управляемого компандирования в технике связи и кибернетике пришлось затронуть ряд сложных специфических задач, причем, естественно, эти задачи не решены в рамках данной работы.

Учитывая наличие монографий и многочисленных публикаций, указанных в библиографии, посвященных специальным аспектам амплитудной, частотной и временной компрессии речевых сигналов, автор считает, что достаточно обратить внимание читателя лишь на те вопросы, которые связаны непосредственно с особенностями применения управляемого компандирования амплитуд звуковых сигналов в той или иной области техники связи.

Поэтому, несмотря на то, что отдельные аспекты применения управляемого компандирования изложены кратко, можно надеяться, что выполненная работа в целом позволяет сделать вывод о перспективности широкого внедрения нового метода передачи звуковых сигналов, а также систематизировать конкретные технические решения по проектированию компандерных систем.

Итак, основная цель книги заключается в обобщении опыта разработки радиотелефонных систем, совершенствовании техники управляемого компандирования и иллюстрации возможностей применения радиокомпандеров в радиосвязи, радиовещании и автоматизированных системах массового обслуживания.

1

Методы передачи звуковых сигналов

1.1. ПЕРЕДАЧА РАДИОТЕЛЕФОННЫХ СИГНАЛОВ

Передача речевых и других звуковых (акустических) сигналов по каналам электросвязи была и будет одной из основных проблем техники передачи сообщений, ибо диалоговое общение людей между собой (а также людей с машинами) всегда останется незаменимым. Поэтому средства передачи звуковых сигналов (речи, музыки, звуков акустических датчиков) непрерывно совершенствуются с целью повышения качества связи, т. е. возможности передачи наибольшего объема сведений без искажений.

Передача звуковых сигналов по каналам электросвязи требует согласования свойств сигналов с характеристиками каналов. К числу специфических свойств речевых сигналов можно отнести многопараметрическую модуляцию, т. е. одновременную модуляцию электрических колебаний (напряжения или тока) по частоте, амплитуде, времени.

В основе всех речепреобразующих устройств лежит учет физиологии речи и слуха. Звуки речи произносятся двумя основными способами. Звонкие звуки (л, м, н и т. д.) порождаются вибрацией голосовых связок при прохождении через них струи воздуха из легких. Давление воздуха и упругость голосовых связок определяют частоту акустических колебаний, которая изменяется у разных людей от 50 до 400 Гц. Эта частота образует основной тон речи. Глухие звуки получаются при завихрениях воздуха, проходящих сквозь сужающийся канал рта (с, ф и т. д.). Некоторые звуки (в, з и др.) формируются двумя указанными способами, действующими одновременно.

При колебании голосовых связок образуется большое число обертонов и спектр звонких звуков является, по существу, дискретным — его энергия распределяется между основной частотой колебания и обертонами, доходящими до 5 кГц. Глухие звуки не имеют основного тона, и их энергия распределена в полосе частот непрерывно. Создаваемые обоими источниками звуки окончательно формируются в голосовом тракте (горло, рот, нос). Акустические резонаторы голосового тракта подчеркивают некоторые частоты и таким образом концентрируют звуковую энергию в определенных полосах частот, называемых формантами. Спектры и интенсивности формант в каждый момент времени оп-

ределяются изменяющейся акустической «архитектурой» речевого аппарата, т. е. положением челюстей, языка, губ, мягкого неба рта. Движение этих органов определяет произносимые звуки, в то время как вибрация голосовых связок проявляется, главным образом, в интонации звуков.

Таким образом, интонация определяет то, как произносится звук, а не то, что произносится.

Для последующего изложения важно подчеркнуть, что речевой аппарат (весьма грубо) можно представить генератором несущих частот, в состав которого входят органы возбуждения звуков (голосовые связки и др.), и модулятором низких частот (рот, нос), так что, если частотный состав речи изменяется в широкой полосе частот, то частота огибающей речи (модулирующая частота) не превышает десятков колебаний в секунду.

Частотный диапазон звуковых сигналов простирается от единиц до десятков тысяч герц, диапазон изменения амплитуд «телефонной» речи достигает 60 дБ (от слабого звука «тихого» абонента до громкого звука «громкого» абонента), а диапазон временных изменений длительности звука речи составляет 20—200 мс.

В то же время коммерческий канал телефонной связи (канал тональных частот — ТЧ канал) ограничен полосой 300—3400 Гц для систем дальней связи, полосой 250—3000 Гц для радиоканалов и полосой 250—2500 Гц для радиоканалов морской связи.

Соответственно динамический диапазон амплитуд речи в канале связи ограничен снизу уровнем шумов, а сверху — нелинейностью модуляционной характеристики радиопередатчика или высокочастотного группового оборудования.

Для согласования свойств сигналов и канала производят компрессию (сжатие) естественных звуковых сигналов по частоте и амплитуде. Первичная частотная компрессия заключается в ограничении спектра речи полосой телефонного канала связи, и дальнейшая обработка сигналов ведется так, чтобы передаваемый сигнал не выходил за пределы стандартной полосы. На современном уровне технологии приобрели значение дискретные методы обработки звуковых аналоговых сигналов, поскольку при передаче дискретных сигналов возможна их регенерация, т. е. исключение накопления искажений при переприемах сигналов в сетях связи.

Другим важным достоинством метода передачи звуковых сигналов в виде дискретных двоичных последовательностей является тот факт, что при этом канал связи может быть выполнен унифицированным, в смысле единообразия тракта для передачи аналоговых и дискретных сигналов (телефонных, телеграфных и фототелеграфных), а также данных — сигналов взаимодействия автоматизированных систем управления (АСУ).

Однако для преобразования речевого сигнала в дискретную форму необходимо существенное расширение полосы частот, что

исключает возможность передачи дискретных речевых сигналов в телефонных каналах ЕАСС.

Так, для трансляции звуковых сигналов полосой в 3 кГц и динамическим диапазоном в 40 дБ в дискретной форме необходимо передать методом импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) около 50 000 бит/с:

$$C = 2F_m \log_2 s,$$

где C — необходимая пропускная способность; F_m — наивысшая частота звука; s — число амплитудных уровней для передачи заданного динамического диапазона.

Итак, можно утверждать, что методы сжатия частотного и амплитудного диапазона речи актуальны, в первую очередь, в тех системах связи, где невозможен «прямой» перевод звуковых сигналов в цифровую форму. К таким системам принадлежат коротковолновые радиолинии. Однако задачи, которые необходимо решить для компрессии звуковых сигналов, имеют общетехническое значение и не сводятся к специфике коротковолновой сети связи, хотя необходимы для ее модернизации.

Рассмотрим поэтому круг задач, решение которых необходимо для создания современного модема (модулятора-демодулятора), обеспечивающего преобразование и передачу речевых сигналов на примере коротковолновой радиолинии. Коротковолновые радиолинии являются экономичным средством малоканальной связи как внутри страны, так и на международных линиях и могут эффективно дополнять сеть ЕАСС [1, 2].

Выбор основных направлений развития и совершенствования стационарных линий радиосвязи определяется техно-экономическими показателями. Большим достижением прошлых лет явилось оборудование сети радиосвязи однополосными передатчиками и приемниками. Однако для того чтобы эффективно использовать новую технику, необходимы модемы речевой связи, которые позволили бы передавать в канале ТЧ двоичные сигналы со скоростью 2400—4800 бит/с.

Организация однополосных радиоканалов с современными модемами и многократными телеграфными системами (мультиплексами) при автозапросе ошибок существенно (на порядок) повышает пропускную способность радиолиний. Увеличение пропускной способности и количества радиоканалов качественно изменяет структуру КВ радиосвязи, позволяет предоставлять новые услуги радиосвязи, а также создает новые условия эксплуатации радиолиний. Цифровые радиоканалы с большой пропускной способностью позволяют использовать новую оконечную радиотелефонную, а также фототелеграфную технику — вокодеры, компандеры и факсимильные аппараты. Известно, что вокодеры и факсимильные аппараты обеспечивают передачу речевой и текстовой информации в виде двоичных сигналов, что дает ряд выгод при передаче информации по радио [2].

К возможным видам обслуживания населения радиосвязью можно отнести: стационарные цифровые и факсимильные каналы радиосвязи с отдаленными и труднодоступными районами страны; временные телефонные и телеграфные радиолинии для резервирования кабельных и радиорелейных линий; каналы связи с подвижными объектами; международные радиолинии на оборудовании, которое сопрягается с зарубежными системами, выполненными по рекомендациям МККР.

С точки зрения оптимизации параметров канала и сигналов, наилучшей является КВ сеть, состоящая из односкачковых пролетов протяженностью 2500—3000 км с пунктами ретрансляции. Исследования, проведенные на нескольких дальних радиотелеграфных линиях, работающих в режиме частотной манипуляции (ЧМ), показали [3], что даже при очень малой пропускной способности (96 Бод) надежность связи (вероятность работы с вероятностью ошибки $P_0 \leqslant 1 \cdot 10^{-4}$) составляет всего 60—80% (табл. 1.1).

ТАБЛИЦА 1.1

Линии радиосвязи	Дальность, км	Частота, кГц	Надежность, %
Москва—Джакарта	9300	23020	80
Москва—Токио	7500	20460	80
Москва—Буэнос-Айрес	13400	24198	60

В то же время испытания многоканальных модемов тонального телеграфирования с фазовой манипуляцией показали, что на односкачковой магистральной радиолинии (при связи по расписанию) можно получить пропускную способность и качество связи, приемлемое для передачи дискретных речевых и факсимильных сигналов, при надежности 90—99% [4].

В табл. 1.2 приведены данные по надежности связи для широтной трассы дальностью 2800 км при использовании модемов с раз-

ТАБЛИЦА 1.2

Спектры сигналов в модеме	Вид сигналов	Скорость манипуляции, Бод	Вид приема	Пропускная способность, бит/с	Частость ошибок при надежности	
					90%	99%
Перекрываются (20 подканалов с ДФМ)	Синхронно-синфазные	120	Одинарный	4800	$7 \cdot 10^{-3}$	$1{,}9 \cdot 10^{-2}$
			Сдвоенный	2400	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$	$8{,}0 \cdot 10^{-3}$
Независимы (12 подканалов с ДФМ)	Синхронные	100	Одинарный	2400	$4 \cdot 10^{-3}$	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$

ными характеристиками. Из табл. 1.1 и 1.2 видно, что при организации сети связи с пропускной способностью 2400 бит/с и выше необходимо ориентироваться на односкачковые радиолинии с сетью ретрансляционных пунктов. Однако [5] ретрансляции используются эффективно лишь при передаче двоичных сигналов, которые можно регенерировать. Для передачи с достаточным качеством посредством вокодеров необходимы подобные двоичные каналы с пропускной способностью 2400—4800 бит/с.

Удовлетворительная передача факсимильных сигналов в двоичной форме также обеспечивается при пропускной способности 2400—4800 бит/с.

Другим общим свойством двоичных речевых и факсимильных сигналов является их большая помехоустойчивость: качество речи и факсимильных отпечатков текстов, чертежей, графиков или рукописей оказывается еще приемлемым при частоте ошибок $P \leqslant 1 \cdot 10^{-2}$, что совершенно недоступно при буквопечатании.

Высокая помехоустойчивость при передаче речи объясняется как большой смысловой избыточностью речевых сигналов, так и возможностью переспроса при разговоре. Кроме того, поскольку принцип действия перспективного вокодера [6] заключается в гармоническом анализе спектра речи и передаче результатов анализа в виде нескольких сигналов, управляющих звуковыми и шумовыми генераторами в синтезаторе речи, существуют дополнительные резервы повышения помехоустойчивости. Они определяются избыточностью управляющих сигналов, что позволяет временно выключать один-два подканала вокодера без ущерба для передачи речевой информации.

Хотя в принципе применение вокодера связано с некоторым снижением качества речевого сигнала, при определенных условиях (высоком качестве исходного сигнала, умеренной степени компрессии спектра речи и др.) качество «синтетической» речи оказывается приемлемым, во всяком случае значительно лучше, чем качество речи, достижимое в обычных однополосных радиотелефонных каналах.

Высокая помехоустойчивость приема факсимильных сигналов объясняется тем, что каждый элемент изображения (буква и т. п.) передается с временным разнесением в соответствии с последовательной разверткой передаваемого бланка фототелеграммы, в результате чего декорреляция (рассредоточение) сгруппированных ошибок происходит автоматически. Внедрение современных факсимильных аппаратов с дискретизаторами и модемов с высокой пропускной способностью позволяет по-новому рассмотреть проблему развития радиотелеграфной сети; в ряде случаев окажется возможной замена дорогих буквопечатающих систем с автозапросом ошибок (АЗО) простой факсимильной техникой.

Для того чтобы КВ радиоканалы могли сопрягаться с наземными и космическими сетями связи, нужно использовать модемы, пригодные для работы в стандартном канале ТЧ с полосой 300—3400 Гц.

На рис. 1.1 представлена структурная схема системы радиосвязи (одного направления) с применением типового модема тонального телеграфирования. Схема позволяет реализовать сеть магистральной связи для передачи речевой, текстовой и графи-

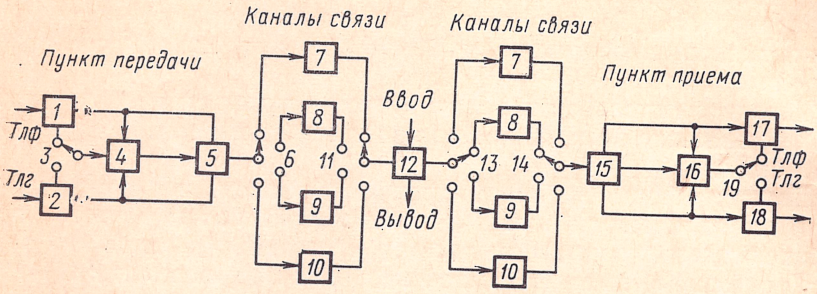


Рис. 1.1. Структурная схема линии связи

ческой информации с ретрансляцией сигналов в пункте переприема и выходом в космические, релейные и кабельные каналы связи.

Аппаратура телефонных каналов должна включаться между выходами абонентских каналов и индивидуальными входами ВЧ систем, а при необходимости совмещаться с абонентским оборудованием.

Для передачи речевых сигналов используется вокодер *1*, преобразующий сигналы динамического микрофона переговорного или абонентского пункта (а в перспективе и угольного микрофона абонентской коммутируемой линии связи) в двоичные сигналы. Текстовые или графические материалы с помощью электромеханического факсимильного аппарата *2* преобразуются в электрические синхронные сигналы. Выходы блоков *1* и *2* через переключатель рода работы *3* (телефон-телеграф) подключены к устройству *4*, обеспечивающему негласность передаваемых по радиоканалам сообщений. Выбор телефонного или телеграфного режима работы предоставляется абоненту, оператору или производится автоматически (при наборе номера корреспондента). Далее преобразованные синхронные сигналы поступают на вход модема, который является функциональным элементом, согласующим передаваемые сигналы с каналом связи.

Передающая часть модема *5* выполняет функции расщепления одноканальных сигналов в многоканальные синфазные сигналы (преобразования последовательного кода в параллельный), а также формирования многоканальных фазоманипулированных сигналов в полосе частот 300—3400 Гц. Выходной (групповой) сигнал модема поступает через коммутатор *6* в один или несколько различных каналов связи — в коротковолновый тракт «передатчик—приемник» *7*, кабельную линию дальней связи *8*, канал радиорелейной связи *9*, канал космической связи *10*. Многоканальный

сигнал со скоростью манипуляции 100—150 Бод может быть передан по каналам связи всех указанных типов. Следовательно, модем является выходным блоком оконечной аппаратуры и связан с остальными функциональными блоками цепями синхронизации.

С выхода канала связи любого типа многотональный сигнал поступает через коммутатор *11* на вход модема *12*, который составляет основное оборудование пункта ретрансляции при переприеме радиосигналов. Приемная часть модема — демодулятор — состоит из устройства разнесенного приема, канальных фазовых детекторов и синхронных регенераторов детектированных сигналов. В пункте ретрансляции (коммутатор *13*) преобразование параллельных сигналов в последовательные не производится, поэтому в состав модема-ретранслятора не входит трансформатор скоростей [4]. Регенерированные сигналы поступают непосредственно на входы фазовых манипуляторов, выходы которых объединяются.

Сигнал через коммутатор *14* поступает на вход модема (приемного полукомплекта *15*), в котором производятся его демодуляция, регенерация и преобразование в одноканальный. Кроме того, в модеме формируются синхросигналы для устройства негласности *16*, синтезатора вокодера *17* и факсимильного приемника *18*.

Выбор вида работы (прием речевых или документальных сообщений) производится переключателем *19*.

Необходимо отметить, что до внедрения цифровых радиоканалов данная функциональная схема радиолинии может быть реализована с помощью техники аналоговой передачи речевых и факсимильных сигналов [1]. В этом случае вокодер заменяется управляемым компандером, модемы в пунктах передачи и приема сигналов исключаются, а в пунктах ретрансляции заменяются трансляторами, реализующими функции разнесенного приема и авторегулировки усиления сигнала. Оконечное оборудование для аналогового варианта радиоканала намного проще и дешевле, чем для цифрового, так как не требует вокодера и модема [7].

Нужно подчеркнуть, что рассмотренная система магистральной телефонно-телеграфной сети может явиться типовой для сетей связи различного назначения. Для дублирования передаваемых сигналов по широкополосным системам связи, где неизбежно используются специализированные модемы, выход устройства негласности на передаче и вход устройства негласности на приеме подключаются к соответствующим модемам.

При необходимости передачи нескольких независимых синхронных телеграфных сигналов они могут вводиться на вход модема (на передаче) и выводиться с выхода модема (на приеме) с помощью соответствующей телеграфной оконечной аппаратуры.

Важной задачей является организация системы автоконтроля качества связи, поскольку в условиях многопролетных трасс своевременный анализ качества связи на каждом пролете обес-

печивает возможность адаптации всей сети связи в соответствии с изменениями ситуации.

Итак, перспективная сеть коротковолновых однополосных линий радиосвязи должна состоять из односкачковых пролетов, связанных в пунктах ретрансляции с наземными и космическими телефонными каналами ЕАСС, поскольку их помехоустойчивость и пропускная способность достаточны для передачи речевых и факсимильных двоичных сигналов, а также сигналов телеграфных систем с АЗО или с симплексными системами повышения достоверности.

Оконечный комплект аппаратуры для передачи цифрового сигнала текста должен состоять из вокодера или компандера и факсимильного аппарата, подключаемых к дискретизатору и к многоканальному модему с фазовой манипуляцией, а ретранслятор — из упрощенного модема, обеспечивающего сдвоенный прием и регенерацию многоканальных сигналов.

Структурная схема современного радиоканала свидетельствует о том, что передача звуковых сигналов является сложной проблемой, содержащей комплекс взаимозависимых и противоречивых технических задач, к числу которых относятся:

— выбор метода компрессии и преобразования звуковых сигналов;

— разработка современных радиотелефонных модемов, обеспечивающих сопряжение радиоканала с абонентскими линиями телефонной связи и основных функциональных блоков этих модемов;

— оптимизация режимов эксплуатации аппаратуры радиосвязи и радиовещания, анализ и измерение специфических искажений звуковых сигналов и разработка методов борьбы с ними.

1.2. АМПЛИТУДНОЕ КОМПАНДИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Поскольку преобразование акустических сигналов (речевых, музыкальных и др.) в электрические сигналы звуковых частот производится с сохранением исходного динамического диапазона, который может достигать 60 и даже 80 дБ, соответственно в радиопроводных системах телефонной связи или высококачественных системах радиовещания, то проблема сжатия динамического диапазона сигналов для передачи их по замирающим и зашумленным каналам связи имеет важное значение. Звуковой электрический сигнал является сигналом сложной формы и образован из токов различных частот и интенсивностей. При амплитудном компандировании (сжатии — расширении динамического диапазона звуковых сигналов) ведется анализ только интенсивностей (амплитуд сигналов), безотносительно к их частоте.

Уровень (или диапазон) амплитуд зависит от индивидуальных особенностей говорящего (абонента), а также от звукового состава языка (сказанные слова или слоги). Средний говорящий

абонент радиолинии имеет динамический диапазон интенсивностей звуков 30—40 дБ, однако разница между самым тихим слогом удаленного абонента и самым громким слогом «близкого» к линии связи оператора превышает 60 дБ. Кроме того, разброс затухания абонентских линий связи, соединяющих абонента телефонной сети с компрессором, составляет 10—30 дБ (Абонент городской или междугородной телефонной сети.)

Большой динамический диапазон (60—80 дБ) сигналов представляет собой проблему при организации связи. Самый слабый сигнал необходимо передать над уровнем шумов, что требует каналов высшего качества. В то же время самый сильный сигнал не должен перегружать линейный усилитель в передатчике. Так, например, если для неискаженной передачи слабого звука необходимая мощность радиопередатчика составляет 1 кВт, то пиковая мощность должна превышать 1 мГВт, что нереально. Поэтому устройства сжатия и расширения динамического диапазона звуковых сигналов — компандеры — стали типовыми модемами в первую очередь на радиотелефонных коротковолновых линиях связи, т. е. там, где энергетика ограничена, а уровень помех высок, а также в трактах радиовещания, где высоки требования к качеству транслируемых сигналов.

Компандер состоит из компрессора и экспандера (что видно из названия), причем компрессор (сжиматель) включается на передающем конце канала связи, а экспандер (расширитель) — на приемном конце.

Компрессор компандера сжимает динамический диапазон входных звуковых сигналов, усиливая слабые сигналы больше чем сильные. Экспандер, наоборот, усиливает сильные сигналы сильнее, а слабые — слабее, в результате чего восстанавливается исходный динамический диапазон. При этом восстановление без искажений возможно только в случае полной обратимости амплитудных характеристик компрессора и экспандера.

Структурная схема компандера показана на рис. 1.2. Компрессирование и экспандирование динамического диапазона вход-

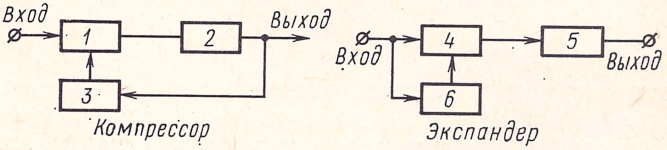


Рис. 1.2. Структурная схема компандера

ных сигналов происходит за счет изменения коэффициента передачи K тракта, состоящего из последовательно включенных регулятора усиления *1* и усилителя *2,* причем регулирование производится напряжением, которое соответствует изменениям огибающей звукового сигнала, выделяемой детектором огибающей *3*. Экспандер также содержит регулятор *4* с усилителем *5* и де-

069391

тектором огибающей *6*. Детектор может быть подключен ко входу тракта (прямое регулирование) или к выходу (обратное регулирование). Обычно в компрессорах используется обратное регулирование (так как динамический диапазон входных амплитуд слишком велик), а в экспандерах — прямое (так как чувствительность регулирования увеличивается).

Коэффициент компрессии, определяемый отношением динамического диапазона уровней на выходе компрессора к динамическому диапазону уровней на его входе, $\alpha = D_2/D_1$ не остается постоянным. Соответственно изменяется и коэффициент экспандирования β, также определяемый отношением динамического диапазона на входе экспандера к динамическому диапазону уровней сигналов на его входе, $\beta = D_4/D_3$.

Для того чтобы избежать искажений формы огибающей звуковых сигналов, амплитудные характеристики компрессора и экспандера должны быть обратимы и, следовательно, $\alpha\beta = 1$, причем $\alpha < 1$, а $\beta > 1$.

Как следует из рис. 1.3 и 1.4, действие экспандера в любой момент времени должно быть обратно действию компрессора.

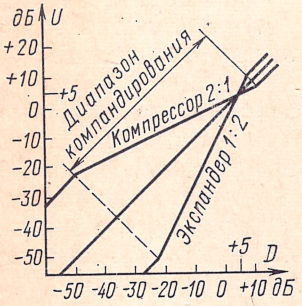


Рис. 1.3. Амплитудная характеристика компандера

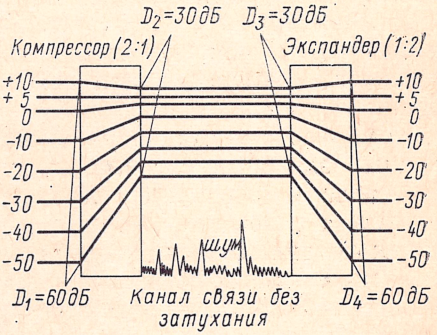


Рис. 1.4 Диаграмма уровней компандера

Если компрессор увеличивает усиление, то экспандер в тот же момент времени увеличивает затухание, равное усилению по абсолютной величине. Для начального уровня (иногда называемого нерегулируемой или «фокальной» точкой) передача компандера постоянна $\alpha = \beta = 1$, для более низких уровней компрессор вносит усиление, для уровней, превышающих начальный — затухание, а экспандер — наоборот.

Таким образом, восстановление исходного динамического диапазона на выходе компандера возможно лишь при полной обратимости амплитудных (как на рис. 1.3) и временных характеристик компрессора и экспандера. При этом важно, чтобы диапазон компандирования охватывал область фокальной точки (5 дБ)

и заканчивался в области 20—30 дБ, обеспечивая линейную передачу сигналов меньшего уровня [7].

Выбросы сигналов, которые встречаются редко, могут быть ограничены без ущерба для качества передачи звуковой информации.

Хотя идеальные характеристики компандера обеспечить невозможно, искажения компандированного сигнала, возникающие из-за деформаций динамического диапазона, малозаметны на слух (при малой компрессии). Это, в первую очередь, объясняется тем, что звуковые сигналы (например речь) обладают большой смысловой избыточностью, а также тем, что человеческий слух не ощущает некоторых деформаций звука.

Избыточность речевых сигналов заключается, например, в квазипериодической структуре гласных звуков, в эффекте маскировки слабых звуков громкими звуками другой частоты и т. д. [6]. Речевой сигнал как бы представлен последовательностью ряда элементарных звуковых сигналов, каждый из которых содержит несущую частоту, которая должна быть передана по каналу связи, и моделирующую огибающую, переменную по длительности — в диапазоне примерно от 20 до 200 мс.

Точность анализа звука длительностью выше 200 мс снижается. В отрезке времени меньше 10 мс ухо неспособно определить частоту звука и форму его огибающей; временны́е искажения длительности элементарных звуков становятся заметными на слух, когда они превышают 10 мс.

Число одновременно слышимых элементарных звуковых сигналов невелико и меняется с изменением длительности модулирующих огибающих, так что это число не превышает десятка при $t=200$ мс и стремится к единице при уменьшении длительности. Этот эффект объясняет известный факт сохранения разборчивости речи при глубоком ограничении речевых сигналов, т. е. можно заключить, что информацию о разборчивости несет один элементарный сигнал с максимальным уровнем звука [19].

Компандеры, позволяющие линейно обрабатывать элементарные звуковые сигналы, длительность которых близка к длительности слогов, называют обычно слоговыми компандерами, а частоту регулирования — слоговой частотой.

Компандирование звуковых сигналов позволяет увеличить число элементарных сигналов, одновременно присутствующих на максимальном уровне загрузки канала связи при сохранении временно́й погрешности регулирования изменений уровня звука в 10 мс.

Следовательно, компандирование является методом согласования свойств речевых сигналов со свойствами канала связи — средством оптимизации передачи звуковой информации.

Диаграмма уровней компандера показана на рис. 1.4. Хотя подобная диаграмма относится к компандерам с небольшим сжатием диапазона ($\alpha=0{,}5$; $\beta=2$), она хорошо иллюстрирует эф-

фект повышения помехоустойчивости и для общего случая компандирования.

Следует отметить, что ограничение степени компрессии в компандерах объясняется двумя причинами. Во-первых, несмотря на то, что увеличение компрессии обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум, оно подчеркивает существующие неравномерности характеристики компандирования, и поэтому вносит необратимые искажения огибающей звуков. Во-вторых, изменения остаточного затухания в канале связи усиливаются экспандером, что также искажает форму звуковой огибающей.

Обычно коэффициент компрессии $\alpha=0{,}5$ и коэффициент экспандирования $\beta=2$, что обеспечивает удовлетворительный компромисс.

Диапазон компандирования обычно несколько меньше возможного диапазона изменений амплитуд звуковых сигналов (как показано на рис. 1.4, он составляет 60 дБ), поскольку максимальные и минимальные уровни, выходящие за указанные рамки, маловероятны и их влияние на восприятие звуков незначительно.

Наибольшее повышение помехоустойчивости достигается в том случае, когда фокальная точка (5 дБ на рис. 1.3 и 1.4) приходится на высший уровень, поскольку при этом все сигналы меньшего уровня будут усилены компрессором. Соответственно будет увеличена средняя мощность сигналов, подаваемых в канал связи. Однако следует помнить, что увеличение средней мощности наиболее эффективно в одноканальных системах связи, а в многоканальных оно может привести к росту перекрестных шумов и вызвать перегрузку групповых усилителей. Поэтому фокальная точка поддерживается на 10—15 дБ ниже максимального уровня диапазона компандирования. Фактический выбор фокальной точки зависит от желаемого улучшения сигнал/шум и допустимого повышения уровня средней мощности.

Таким образом, необходимым условием применения компандера в тракте связи или вещания является сохранение постоянства затухания в канале связи между компрессором и экспандером, что должно быть обеспечено системой авторегулировки усиления в тракте.

1.3. УПРАВЛЯЕМОЕ КОМПАНДИРОВАНИЕ

Поскольку сохранение постоянства затухания в радиоканале казалось невозможным, компандеры до последнего времени не использовались в радиосвязи, хотя первые попытки их применения делались еще в тридцатые годы. Дело в том, что цепь АРУ радиоприемника, работающего в режиме АМ (ОБП), не должна реагировать на изменения уровня принимаемого сигнала, вызываемого звуковой модуляцией, и, следовательно, не может реагировать на замирания, частота которых близка к слоговой частоте, а это исключает борьбу с замираниями сигналов на входе экспандера. Экспандирование же сигнала с замираниями ведет

к недопустимым искажениям звука и повышению уровня шума в паузе, причем это повышение пропорционально коэффициенту экспандирования.

Между тем в технике анализа и преобразования речевых сигналов был известен принцип раздельной передачи частотных и амплитудных составляющих звуков. Так, при исследовании специальных телефонных систем, основанных на методе предельного ограничения (клиппирования) речи, было обнаружено [7], что если передать по какому-либо дополнительному параллельному каналу огибающую речевого сигнала, а на выходе приемной части тракта промодулировать этой огибающей ограниченный сигнал, т. е. восстановить процесс изменения уровней речи во времени и подавить шумы в паузе, то качество (разборчивость и натуральность речи) мало отличается от того, которое наблюдается без ограничения. Этот метод передачи клиппированной речи с огибающей (опубликованный в 1947 г.), позволил повысить слоговую разборчивость с 40% (без передачи огибающей) до 65% (при передаче огибающей).

Однако амплитудное ограничение, как предельный случай компрессии, отличается от компандирования отсутствием обратимости, т. е. невозможностью восстановления исходного динамического диапазона уровней сигнала.

Кроме того, ограничение речевых сигналов ведет к зашумлению пауз и появлению комбинационных частот — продуктов нелинейности, что делает речь «жесткой».

В 1961 г. появилась разработка, удачно сочетающая компандирование с методом дополнительной передачи огибающей речи. Этот метод, получивший впоследствии по решению МККР (Осло, 1966) название «Линкомпекс» (сокращение от «Linked Compressor and Expandor» — связанные компрессор и экспандер), открыл новые возможности в проектировании современных модемов радиотелефонной линии связи [9].

Принцип работы системы «Линкомпекс» заключается в том, что компандирование звуковых сигналов ведется в соответствии с управляющими сигналами огибающей, передаваемыми по автономному подканалу в полосе стандартного канала связи. Таким образом, при управляемом компандировании коэффициент передачи компрессора и экспандера изменяется одновременно в соответствии с уровнем огибающей амплитуд исходных звуковых сигналов. Система «Линкомпекс» содержит в составе стандартного телефонного канала МККР (300—3000 Гц) звуковой (300—2700 Гц) и управляющий (2700—3000 Гц) подканалы [10].

Поскольку управление компрессором и экспандером производится со слоговой частотой, то каждый звуковой элемент линейно усиливается в соответствии с нелинейной амплитудной характеристикой компрессора. Значение слоговой (силлабической) частоты в речевом сигнале определяется движением крупных речеобразующих органов (челюстей, губ, языка) и поэтому не превышает 10—20 Гц.

Следовательно, канал передачи огибающей в системах телефонной связи может иметь низкую пропускную способность.

Если в телефонии максимальная слоговая частота определяется свойствами речи, то в системах вещания, где кроме речевых передаются и другие звуковые сигналы (музыка, репортаж и т. д.), максимальное значение слоговой частоты может быть выше, но ограничения на скорость передачи огибающей звуков существуют в процессе их восприятия человеком, так как разрешающая способность слуха ограничена величиной 10—20 мс. Однако «замедление» передачи взрывных звуков длительностью 15—25 мс (п, т) ведет к их перерождению в (ф, с) [7]. Итак, исходя из физиологических свойств речи и слуха полоса частот канала управления не должна превышать 20 Гц для телефонии и 40 Гц для вещания, а временные искажения восстановленных звуков должны быть меньше ±10 мс.

Структурная схема управляемого компандера для радиоканала (радиокомпандера) изображена на рис. 1.5, а временная диаграмма его работы — на рис. 1.6 (сигналы *а—и* диаграммы обозначены на рис. 1.5).

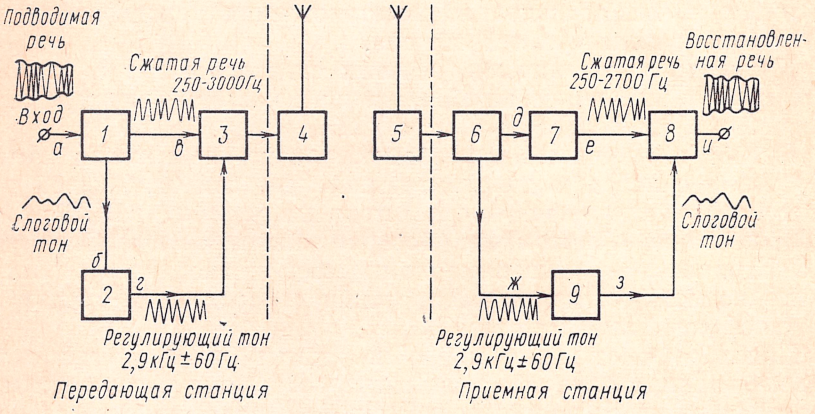


Рис. 1.5. Структурная схема радиокомпандера

Звуковой сигнал (рис. 1.5*а*) показан двумя слогами, разделенными паузой, а каждый слог содержит частотные компоненты звука (наполнение) и амплитудные компоненты (огибающая). Сигнал изменяется по уровню в соответствии с естественным динамическим диапазоном и поступает на вход управляемого компрессора *1*. Управляющий сигнал компрессора представляет собой напряжение (ток), форма которого соответствует форме огибающей слогов речи (рис. 1.5*б*). Управляя усилением компрессора линейно внутри каждого слога, можно обеспечить постоянный уровень выходного сигнала компрессора *1* (рис. 1.5*в*), причем звуковые сигналы (рис. 1.5*а*) и управляющие (рис. 1.5*б*) должны быть совмещены во времени, с тем чтобы скомпенсировать запаз-

дывание управления, возникающее из-за инерционности детектирования звуковой огибающей (см. рис. 1.5*а* и *б*). Компрессированный сигнал постоянного уровня (рис. 1.5*в*) представляет собой частотную составляющую звукового сигнала и передается в звуковом подканале системы «Линкомпекс». Управляющий сигнал (амплитудная составляющая речи) поступает на частотный модулятор *2* (рис. 1.5*б*) в качестве модулирующего сигнала. С выхода модулятора *2* снимается частотномодулированный сигнал (рис. 1.5*г*), который переносит информацию об амплитуде слоговой огибающей в подканале управления. Звуковой и управляющий сигналы (рис. 1.5*в* и *г*), разнесенные по частоте, складываются в сумматоре *3* и далее транслируются по соединительной линии к радиопередатчику *4*. Принимаемый двухканальный сигнал поступает с выхода приемника *5* на разделитель *6*, выходы которого подключены соответственно к звуковому и управляющему подканалам демодулятора системы «Линкомпекс».

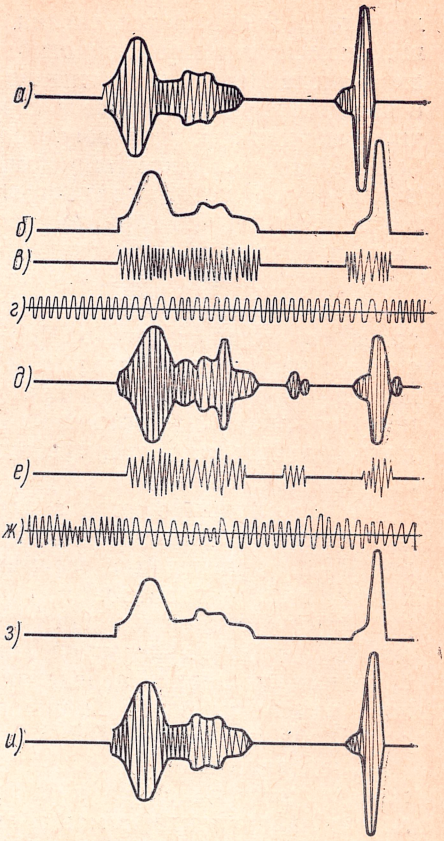


Рис. 1.6. Временна́я диаграмма радиокомпандера

Звуковые сигналы, искаженные по амплитуде замираниями и помехами (рис. 1.5*д*), подаются на вход регулятора замираний *7*, выполненного по схеме неуправляемого компрессора. Регулятор замираний *7* позволяет сглаживать амплитуду замирающих сигналов, с тем чтобы на вход экспандера поступали сигналы постоянного уровня (рис. 1.5*е*). Эта важная функция возможна, поскольку на передаче сигнал скомпрессирован до постоянного уровня (рис. 1.5*в*).

Преобразуя сигналы постоянного уровня, управляемый экспандер исключает возможность усиления неравномерностей затухания, возникающих в тракте, т. е. реализует возможность увеличения коэффициента компандирования, что невозможно в случае обычного (неуправляемого) компандера, где коэффициент компандирования не превышает значения двух-трех раз.

Частотномодулированный сигнал управления с разделителя *6* поступает на частотный детектор *9* (рис. 1.5*ж*). Амплитудные флуктуации этого сигнала ликвидируются, и с выхода частотного

детектора *9* снимается сигнал управления (рис. 1.5*з*), отражающий изменения звуковой огибающей. Поступая на управляющий вход экспандера *8*, эти сигналы обеспечивают линейное усиление в каждом звуковом слоге в соответствии с крутизной характеристики экспандера, чем восстанавливается исходный рисунок огибающей звука. Таким образом, на выходе экспандера *8* восстанавливаются исходные частотно-амплитудно-временные характеристики звука, что гарантирует естественность звучания речи, музыки и других акустических программ (см. рис. 1.5*а, и*).

Итак, принцип действия радиокомпандера заключается в том, что с целью глубокого амплитудного компандирования звуковых сигналов, независимого от флуктуаций уровня сигналов в канале связи, информация о степени компрессии речевых сигналов передается на экспандер по отдельному подканалу связи, защищенному от влияния замираний. Реализация этого принципа позволяет получить ряд преимуществ в организации радиосвязи и радиовещания.

Первое преимущество заключается в улучшении использования мощности радиопередатчика, поскольку при линейном режиме работы передатчика его максимальная мощность определяется динамическим диапазоном звукового сигнала. Для обеспечения расчетного отношения сигнал/помеха на входе приемника при минимальном уровне звука («тихий» звук «тихого» абонента) необходима мощность передатчика P, а при динамическом диапазоне изменения звука D пиковая мощность должна увеличиваться в D раз, т. е. $P_{пик} = DP$.

Следовательно, уменьшение пик-фактора (т. е. отношения пикового значения звука к среднему) позволяет существенно увеличить эквивалентную мощность передатчика.

Существующие методы оптимизации загрузки передатчика менее эффективны, поскольку ограничение или компрессирование амплитуды сигналов ведет к необратимым деформациям звуков, а автоматическое регулирование мощности передатчика дает ограниченные результаты и вносит помехи в «эфир» [10].

Второе преимущество метода управляемого компандирования так же, как и первое, является следствием возможности компрессии передаваемого сигнала до постоянного уровня. При этом можно считать, что флуктуации уровня на выходе радиоприемника определяются лишь переменным затуханием тракта связи (замираниями сигнала). Включение схемы быстродействующей АРУ на входе экспандера (регулятора замираний) позволяет скомпрессировать колебания уровня на входе экспандера и тем самым исключить усиление неравномерности затухания тракта экспандера, т. е. исключить недостаток, свойственный методу компандирования без передачи управляющего сигнала. Включение регулятора замираний позволяет дополнить «медленную» систему АРУ радиоприемника «быстрой» АРУ, т. е. получить компенсацию и «медленных», и «быстрых» замираний. В других системах АРУ звуковых сигналов этот эффект недостижим, по-

скольку постоянная времени АРУ обычно сопряжена со скоростью изменения уровня звуков так, чтобы исключить функционирование АРУ от изменения звуков. Исключение быстрых замираний эквивалентно увеличению отношения «сигнал/помеха» H на входе приемника, причем это увеличение пропорционально диапазону сжатия уровня $D_р$ регулятором замираний: $H=D_рH_1$, где H_1 — необходимое отношение сигнал/помеха без применения управления в компандере.

Наконец, третье преимущество метода управляемого компандирования основано на том, что сам сигнал управления экспандером формируется не из звуковых сигналов (при прямом или обратном регулировании), как это имеет место в обычных компандерах, а передается с компрессора по отдельному управляющему подканалу, причем передача сигнала управления производится методом частотной модуляции, невосприимчивой к амплитудным искажениям (замираниям, завышениям уровня и т. д.).

Передача управляющего сигнала по помехоустойчивому каналу позволяет исключить влияние помех, существующих в звуковом канале, на сигнал управления, а также подавить шумы в паузах, что очень важно для восприятия звука. Выигрыш в помехоустойчивости управляющего канала, таким образом, повышается тем более, чем уже его полоса по сравнению с полосой звукового канала (соответственно уменьшается воздействие шумов на управляющий экспандером сигнал). Следовательно, уменьшение шумов, воздействующих на управляющий сигнал, пропорционально отношению полос звукового $F_з$ и управляющего подканалов $F_у$:

$$B = c\frac{F_з}{F_у},$$

где B — выигрыш в помехоустойчивости; c — коэффициент пропорциональности.

Применение метода управляемого компандирования обеспечивает и другие преимущества в организации радиосвязи и радиовещания, однако для повышения помехоустойчивости связи указанные три особенности метода можно считать основными.

Не следует, однако, полагать, что рост помехоустойчивости можно оценить суммой выигрышей по каждому преимуществу, поскольку как сам звуковой сигнал, так и помехи в канале связи являются случайными процессами. Поэтому полагая, что звуковые элементы, замирания и помехи действуют независимо во времени, можно утверждать, что маскимальный выигрыш в помехоустойчивости наблюдается только в условиях совпадения самого «слабого» звука, самого «глубокого» замирания и самой «большой» помехи, т. е. в наиболее неблагоприятной ситуации. Иначе говоря, максимальный эффект метода управляемого компандирования наблюдается в течение времени ухудшения качества связи ΔT:

$$\Delta T = P_1 P_2 P_3 T,$$

где T — общее время действия канала связи; P_1, P_2, P_3 — соответственно вероятности появления самого «тихого» звука на входе компрессора, самого «глубокого» замирания на входе экспандера и самой «сильной» помехи в звуковом канале.

Общим положительным эффектом метода управляемого компандирования является появившаяся возможность сопряжения радиоканалов с наземными и космическими системами связи, что ранее считалось невозможным.

По существу, это достигается стабилизацией затухания на выходе радиоканала во всем динамическом диапазоне изменений передаваемых звуковых сигналов.

1.4. АМПЛИТУДНОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ РЕЧИ

Если в коммерческих системах магистральной (межконтинентальной) радиосвязи фиксированной и морской служб прочно утвердился метод управляемого компандирования речи, то в служебной связи, где не требуется «коммерческого» качества звучания, но важна разборчивость речи, находят применение упрощенные методы.

Спецификой служебной связи (производственной, командной, поисковой и т. д.), является мобильность, так как большинство абонентов подвижны. Кроме того, абоненты служебной связи не удалены от радиосредств, им не требуется соединительная линия для подключения к передатчику. В то же время в служебной связи очень важно сжатие динамического диапазона речи, поскольку энергетика радиолинии очень ограничена (малая мощность передатчика, малоэффективные антенны и т. д.). Эта же проблема стоит в низовой связи — на районном или даже областном уровне.

Пусть, например, для поддержания связи необходимо обеспечить превышение сигнала над помехой в 2 раза (6 дБ). В этом случае максимальный звук выше помех, но средний уровень речи подавлен шумом.

Применяя сжатие динамического диапазона речи посредством ограничения (клиппирования) амплитуд, можно добиться перевода работы радиопередатчика в «телеграфный» режим и осуществить связь в условиях зашумленного радиоканала. Физической основой метода клиппирования является высокая разборчивость ограниченных по амплитуде речевых сигналов, достигающая 70%, т. е. полная словесная и фразовая разборчивость речи [7]. Конечно, «клиппированная» речь имеет специфическую «жесткость», но для служебной связи этот недостаток не является определяющим.

Ограничение диапазона звуков обеспечивается предельной безынерционной компрессией амплитуд напряжений звуковых сигналов так, что фактически на вход канала связи поступают двоичные сигналы, фронты которых соответствуют временно́му положению нулевых переходов звукового напряжения.

Разные исследователи подтвердили тот факт, что речевой сигнал остается разборчивым при предельном клиппировании, т. е. при исключении амплитудной составляющей и сохранении частотной составляющей (частоты нулевых переходов), но теряет разборчивость при сохранении амплитудных признаков и потере частотных [7, 12, 13].

Специфический тембр клиппированной речи объясняется тем, что при ограничении звуков повышается уровень гармонических спектров — комбинационных продуктов нелинейного преобразования сигналов.

Существенным недостатком метода клиппирования является зашумление пауз речи, что требует защиты микрофона от акустических шумов (например, используется ларингофон).

Существуют способы снижения заметности искажений, вызываемых клиппированием, что позволяет эффективно использовать этот метод для оптимизации работы маломощных однополосных радиостанций. Основным средством повышения разборчивости клиппированной речи в условиях шумов является обратимое изменение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) звукового тракта. Сущность способа состоит в выравнивании частотного спектра речи на входе ограничителя путем подъема высших частот с наклоном АЧХ 6 дБ на октаву и соответствующего обратного преобразования сигналов на приеме. Этим достигается эквивалентный эффект клиппирования во всем диапазоне частот.

Для улучшения качества звучания клиппированной речи должна применяться фильтрация продуктов нелинейного преобразования с учетом того, что, в принципе, любая фильтрация прямоугольного сигнала увеличивает пик-фактор. Таким образом, в каждом конкретном случае проектирования системы должен быть найден компромисс между стремлением обеспечить максимальные энергетические параметры тракта и сохранить приемлемое звучание речи.

Так, в однополосных радиопередатчиках подобный компромисс достигается за счет ограничения не входных модулирующих сигналов, так как продукты клиппирования попадают в тракт передачи, а однополосных сигналов, при ограничении которых значительная часть спектра нелинейных искажений лежит далеко за пределами звукового канала [13].

На рис. 1.7 приведена структурная схема устройства формирования однополосного сигнала с клиппированием речи. Речевой сигнал поступает на низкочастотный усилитель *1* с коррекцией АЧХ и переносится затем посредством модулятора *2* в область высоких частот. Затем с помощью полосового фильтра *3* выделяется однополосный сигнал, который клиппируется ограничителем *4* и вновь фильтруется полосовым фильтром *5*.

Клиппированный однополосный сигнал поступает непосредственно на передатчик *6*.

Преимущество ограничения речи на повышенной частоте заключается также в резком возрастании числа нулевых переходов,

что можно сравнить по эффективности с повышением частоты квантования при ИКМ или с уменьшением «недостаточности несущей» при АМ.

Недостатками метода клиппирования по сравнению с компандированием речи являются:

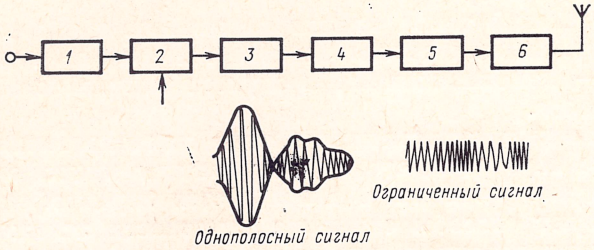


Рис. 1.7. Структурная схема ОБП передатчика с ограничением

безынерционное преобразование сигналов, исключающее линейное усиление внутри слога, т. е. наличие нелинейных продуктов ограничения, зашумляющих звуковой тракт;

усиление шумов входного тракта, т. е. зашумление паузы и искажение временно́го рисунка звуков (скважности слогов);

необратимость в преобразовании звуков, поскольку прямоугольная характеристика ограничителя исключает восстановление оригинальной кривой огибающей звуков.

Достоинством метода клиппирования речи является простота, и именно поэтому он находит применение в тех системах связи, где основные требования предъявляются к разборчивости, а не натуральности речи.

Существенное улучшение качества клиппированной речи обеспечивает метод управляемого клиппирования, который, как и метод управляемого компандирования, имеет ряд преимуществ. Этот метод получил название «Френа» (сокращенно от «Erequency and amplitude — Frena»), т. е. «частота и амплитуда», поскольку предусматривается раздельная передача речевых и амплитудных компонентов речи с последующим их объединением в приемном устройстве. Достоинство метода определяется тем, что помехоустойчивость приема повышается по сравнению с обычным методом передачи АМ сигналов при равной энергетике радиолинии. Метод «Френа», как и «Линкомпекс», предполагает передачу сигналов огибающей речи по отдельному управляющему подканалу, что позволяет на приеме восстановить полностью (или частично — в зависимости от конкретной необходимости) амплитудно-временно́й рисунок огибающей звуков речи.

Система «Френа» разработана фирмой «Филипс» для связи с подвижными объектами мобильных служб (полиция, скорая помощь, пожарная служба и т. п.). В этой системе речевым сигналом модулируются колебания высокой частоты однополосного пе-

редатчика (рис. 1.8). Модулятор *1* нагружен на фильтр *2*, выделяющий одну боковую полосу. Далее однополосный сигнал симметрично клиппируется по амплитуде ограничителем *3* и через фильтр *4* подается на сумматор *7*, ко второму входу которого подаются управляющие сигналы на несущей частоте. Эти сигна-

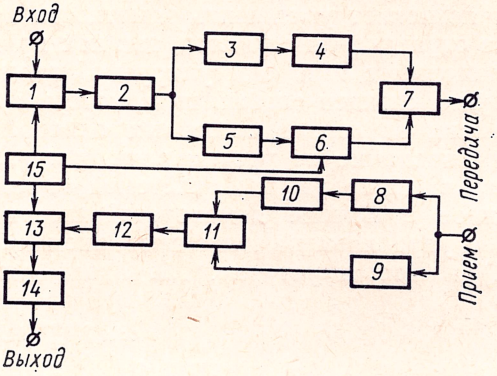


Рис. 1.8. Структурная схема системы «Френа»

лы формируются амплитудным детектором огибающей однополосных сигналов *5* и фильтруются в полосе 0—100 Гц. Амплитудный модулятор *6* обеспечивает восстановление подавленной несущей и модуляцию несущей управляющим сигналом огибающей речи. Звуковой сигнал формируется в сумматоре *7* и занимает всю полосу стандартного телефонного радиоканала (250—3000 Гц), а сигнал управления передается вне ее методом амплитудной модуляции.

В приемной части модема «Френа» подканалы расфильтровываются полосовыми фильтрами *8* и *9*, полосы которых соответствуют спектрам речевого и управляющего сигналов. Речевой сигнал поступает на амплитудный ограничитель *10*, чем достигается ликвидация изменений уровня входных сигналов, являющихся результатом замираний. Таким образом, клиппирование сигналов на передаче позволяет ликвидировать флуктуации уровня замирающих сигналов на приеме.

Клиппированный звуковой сигнал и сигнал огибающей речи подаются на модулятор *11*, с выхода которого посредством фильтра *12* выделяется однополосный звуковой сигнал. Этот сигнал переносится с помощью преобразователя *13* в область звуковых частот и с выхода фильтра *14* поступает к абоненту. Модем «Френа» (рис. 1.8) содержит синхрогенератор *15*. Хотя недостатком системы «Френа» является использование метода амплитудной модуляции (АМ) для передачи управляющих сигналов, эта система обеспечивает существенный выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с обычной однополосной радиостанцией. Этот

выигрыш определяется, кроме выравнивания затухания в канале связи, и существенным ослаблением шумов.

Так, сужение динамического диапазона входных сигналов обеспечивает резкое усиление слабых звуков, а передача сигнала управления в узкополосном канале позволяет уменьшить шумовую полосу в сигналах огибающей речи. Метод управляемого клиппирования позволяет уменьшить заметность искажений, возникающих из-за ограничения сигналов, так как принимаемый уровень шума изменяется в такт с регулируемой громкостью звуков. При слабых звуках слышен слабый шум, который возрастает при появлении громких звуков. В линейных однополосных трактах шум одинаков независимо от уровня речи, что является существенным недостатком по сравнению с системой «Френа».

Количественное сравнение помехоустойчивости однополосных каналов связи с управляемым клиппированием («Френа») и линейного (ОБП) иллюстрирует рис. 1.9. Здесь показаны измене-

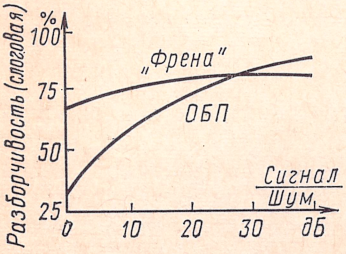


Рис. 1.9. Артикуляционные характеристики систем «Френа» и ОБП

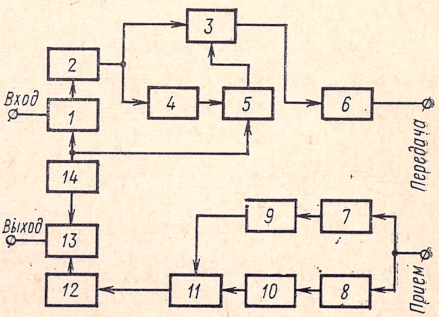


Рис. 1.10. Структурная схема системы «Френак»

ния слоговой артикуляции в зависимости от уровня шума в звуковом канале.

Из сопоставления графиков на рис. 1.9 видно, что при высоком соотношении сигнал/шум разборчивость в системе «Френа» несколько ниже, чем в линейном тракте ОБП. Это вызвано искажениями сигналов при клиппировании, которые наблюдаются даже в отсутствие шумов. Однако при возрастании шумов (ниже значения сигнал/шум 30 дБ) разборчивость в системе «Френа» падает гораздо медленнее, чем при однополосной модуляции, причем выигрыш в разборчивости увеличивается с ростом уровня шума. Указанные результаты снижаются при наличии шума в канале управления, ввиду чего необходимо поддерживать соотношение сигнал/шум в этом канале не менее 20—25 дБ.

Недостаточная помехоустойчивость управляющего канала, снижающая эффективность системы «Френа», привела к появлению усовершенствованной системы «Френак», в которой управля-

ющие сигналы передаются кодовым способом, указывая только два состояния огибающей речи — имеется речь на входе канала или ее нет. Конечно, это исключает возможность восстановления формы естественной огибающей звуков, но такое нарушение структуры речевого сигнала после его клиппирования мало что меняет в смысле ухудшения восприятия. Зато помехоустойчивость приема сигналов существенно возрастает за счет исключения шумов, возникающих в паузах между словами и слогами.

В качестве несущего колебания управляющего сигнала, как и в системе «Френа», используется пилот-сигнал передатчика.

Таким образом, метод «Френак» предусматривает поочередную передачу звуковых и управляющих сигналов, в результате чего передатчик излучает одноканальный сигнал постоянного уровня.

Так как полоса управляющего канала гораздо у́же звукового, а уровень сигналов постоянен, то помехоустойчивость управляющих сигналов значительно выше, чем в системе «Френа». Так, если в частотном подканале отношение сигнал/шум составляет 4 дБ (полоса 3 кГц), то двоичный амплитудный канал (при полосе в 0,1 кГц) должен иметь преимущество на 15 дБ, т. е. около 19 дБ. Поэтому даже в условиях сильных шумов возможно помехоустойчивое выделение управляющего сигнала. Итак, принцип метода «Френак» заключается в передаче пилот-сигнала в паузах речи с целью подавления шума в паузах речи.

Структурная схема системы «Френак» (рис. 1.10) содержит, в основном, те же функциональные блоки, что и система «Френа». Речевые сигналы подаются на модулятор *1,* на выходе которого включен фильтр *2,* выделяющий высокочастотный однополосный сигнал. Затем канал разделяется на «частотный» подканал, в котором включен ограничитель *3,* и «амплитудный» подканал, в котором включен амплитудный детектор *4,* отделяющий сигналы речи от паузы (в соответствии с установленным пороговым уровнем, превышающим уровень шума), и реле *5,* выполненное в виде селектора, направляющего несущую частоту в ограничитель во время пауз между словами или слогами. Выход ограничителя *3* подключен через фильтр *6,* аналогичный фильтру *2,* к усилителю мощности передатчика.

На приеме «частотные» и «амплитудные» сигналы, следующие с передачи поочередно, разделяются фильтрами *7* и *8* на звуковой и управляющий подканалы. Частотный сигнал поступает на ограничитель *9,* исключающий влияние замираний, а амплитудный сигнал детектируется амплитудным детектором *10* и подается на управляющий вход реле *11,* на сигнальный вход которого поступают звуковые клиппированные сигналы, пропускаемые на вход фильтра *12* только при наличии речи, поскольку во время пауз реле *11* «заземляет» вход фильтра *12.* Речевые сигналы переносятся в область звуковых частот посредством модулятора *13,* который, как и модулятор *1,* подключен к синхрогенератору несущей *14.*

Таким образом, одновременно с повышением помехоустойчивости в модеме «Френак» обеспечено и упрощение аппаратуры. Это достигнуто, в частности, за счет использования свойств ограничителя подавлять слабый сигнал сильным при поступлении на его входы двух сигналов разных частот и амплитуд. Таким образом, при наличии речевого сигнала управляющий сигнал подавляется ограничителем, а в паузах передается только управляющий сигнал. Эффективность подобной системы зависит от правильного выбора амплитуды управляющего сигнала, который должен быть меньше ожидаемого уровня речи, но больше ожидаемого уровня шумов.

Рассмотрение систем «Френа» и «Френак» показывает, что возможны два варианта аппаратуры с управляемым клиппированием при параллельном («Френа») и последовательном («Френак») методах передачи управляющих сигналов и способах управления речевым сигналом на приеме.

Помехоустойчивость систем «Френа» и «Френак» иллюстрируется данными на рис. 1.9. Так как при испытаниях шум подавался только в звуковой канал, в то время как канал управления находился в идеальных условиях, следовательно, различий в выполнении этого канала на рис. 1.9 не отражено.

Сопоставление различных модификаций системы «Френа» (с разными способами передачи управляющих сигналов) приводится в табл. 1.3 [8].

ТАБЛИЦА 1.3

Метод передачи речевых сигналов в телефонном канале	Однополосная модуляция	«Френа» с АМ	«Френа» с ЧМ	«Френак»
Минимально необходимое отношение сигнал/шум (по мощности в дБ)	10	8	6	4

Следовательно, метод управляемого клиппирования может эффективно использоваться в системах связи, где не требуется коммерческого качества речи, а достаточна высокая разборчивость.

Необходимо упомянуть еще одну важную особенность служебной (низовой) связи, которая заключается в том, что стабильность мобильных радиосредств не может быть весьма высокой. Это является серьезным препятствием для использования управляемых компандеров в низовой связи, так как требуется высокая точность передачи изменений частоты в управлющем подканале. Поэтому ценность модемов «Френа» и «Френак», в которых управляющие сигналы транслируются на несущей частоте передатчика, заключается и в том, что имеется возможность обеспечения автоподстройки частоты в приемнике.

Отечественным вариантом системы «Френа» является метод передачи клиппированных сигналов с фазовой манипуляцией [15] при управлении частотой передатчика по закону огибающей речи

[16]. Этот метод обеспечивает постоянство уровня модулирующих сигналов и помехоустойчивое детектирование. Передача огибающей речи помехоустойчивым методом частотной модуляции позволяет восстановить начальный естественный динамический диапазон речи и подавить как помехи радиоканала, так и шумы клиппирования.

Применение фазовой манипуляции позволяет обеспечить наиболее помехоустойчивый вид радиосвязи, так как передатчик излучает сигнал постоянного уровня — колебания с комбинированной частотно-фазовой модуляцией, а в приемнике можно использовать синхронное детектирование фазоманипулированных сигналов. Можно добавить, что при фазовом детектировании речевых сигналов нет необходимости в применении «относительной» фазовой манипуляции [15], исключающей эффект «обратной работы», что существенно упрощает аппаратуру. Дело в том, что речевой сигнал может передаваться и «позитивом» и «негативом», так как ухо слушателя не реагирует на полярность звуковых колебаний.

Структурная схема, показанная на рис. 1.11, демонстрирует выполнение аппаратуры, пригодной для проектирования систем

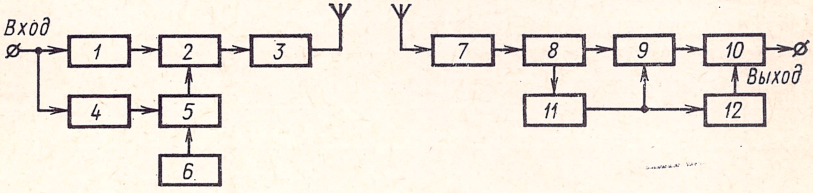


Рис. 1.11. Структурная схема частотно-фазового модема

подвижной или низовой связи с использованием маломощных передатчиков. Речевой сигнал поступает на ограничитель *1*, который может быть выполнен в виде однополосного преобразователя с клиппированием. Выходные сигналы ограничителя *1* поданы на манипулирующий выход фазового манипулятора *2*, выход которого соединен с усилителем мощности передатчика *3*. В цепи управления последовательно включены детектор огибающей *4* и частотный модулятор *5*. С генератора *6* снимается несущее колебание передатчика, которое смещается по частоте в соответствии с законом изменения огибающей речи. Частотномодулированное колебание дополнительно манипулируется по фазе в соответствии с моментом нулевых переходов звуковых сигналов, т. е. в случайные (асинхронные моменты времени).

Принимаемые сигналы поступают с выхода радиоприемника *7* в ограничитель *8*, ликвидирующий быстрые замирания сигналов. Затем прямоугольные сигналы поступают на фазовый детектор *9* и блок снятия манипуляции *11*, выполненный в виде умножителя частоты. После умножения по частоте фазоманипулированный сигнал фильтруется, делится по частоте и в виде опорного напряжения с постоянной фазой поступает на фазовый детектор *9*.

Одновременно удвоенный по частоте сигнал (с удвоенной соответственно девиацией частоты) подается на частотный детектор *12*, выделяющий амплитудную составляющую речевого сигнала. Этот сигнал огибающей поступает в виде модулирующего на управляющий вход амплитудного модулятора *10*, на сигнальный вход которого подведены прямоугольные сигналы с частотой составляющей речи с фазового детектора *9*. Последний может быть выполнен дискретным для уменьшения влияния временны́х искажений асинхронных сигналов [4]. С выхода амплитудного модулятора *10* снимается речевой сигнал, динамический диапазон которого соответствует естественному.

Необходимо отметить, что манипуляция фазы должна выполняться на 180° в фазовых точках 45 и 135°, что позволяет минимизировать паразитную амплитудную манипуляцию несущего колебания.

Недостатками частотно-фазового метода передачи клиппированной речи являются необходимость расширения полосы канала опорного напряжения до значения девиации частоты и невозможность использования многократной фазовой манипуляции, ввиду случайного характера манипулирующего сигнала.

Однако главным недостатком метода «Френа» и прочих методов клиппирования речи является то, что двухуровневый речевой сигнал является асинхронным. Задача превращения асинхронного дискретного сигнала в изохронный решается временны́м квантованием клиппированных сигналов.

1.5. КВАНТОВАНИЕ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Ограничение амплитуды речевых сигналов до постоянного уровня позволяет передавать их в виде двоичных импульсов по дискретным каналам связи, например с фазовой манипуляцией [15, 16].

Однако, поскольку временно́е положение фронтов клиппированных сигналов случайное, необходимо их временно́е квантование, т. е. преобразование в синхронный равномерный двоичный код. Временно́е квантование аналоговых сигналов используется в широкополосных системах модуляции — импульсно-кодовой, дельта-модуляции и т. д. Однако классические методы импульсной модуляции здесь не рассматриваются, так как требуют для передачи речи использования широкополосных каналов связи емкостью до 56 кбит, что исключает возможность применения стандартного ТЧ канала для передачи речи в дискретной форме.

Передача звуковых сигналов в двоичной форме позволяет использовать эффективные методы регенерации и засекречивания информации, что необходимо при использовании радиосвязи, поскольку радиоканал организуется с переприемами и доступен для прослушивания.

Регенерация, т. е. восстановление формы двоичных импульсов, позволяет отсеивать временны́е искажения сигналов при их переприеме в пунктах ретрансляции, что обеспечивает практически неограниченную дальность связи [4]. Регенерация аналоговых сигналов невозможна, так как накопление шумов в полосе канала связи происходит одновременно с усилением сигналов. Регенерация двоичных сигналов возможна только при наличии синхросигналов, временно́е положение которых определяется математическим ожиданием распределения временны́х отметок фронтов регенерирующих сигналов. Существуют два метода регенерации — стробирование и интегрирование.

При стробировании каждый бинарный знак формируется в соответствии с полярностью средней, наиболее помехоустойчивой, части знака, которая опробывается синхроимпульсом с частотой манипуляции. При интегрировании каждый бинарный знак формируется в соответствии с величиной энергии сигнала, запасенной за время существования знака, причем этот отрезок времени ограничен периодом синхроимпульсов.

Поскольку методы стробирования и интегрирования обеспечивают в среднем одинаковую помехоустойчивость, но в разных конкретных условиях различно реагируют на специфические помехи, то обычно используют комбинации этих методов. Так, при регенерации стробированием возможны ложные отсчеты (ошибки) при дроблениях сигналов в центре двоичного знака и поэтому перед регенератором включают низкочастотный фильтр манипуляции. При интегрировании, наоборот, ошибки возникают при «переменных преобладаниях», т. е. в тех случаях, когда фронты сигналов имеют временны́е искажения длительности сигнала. Соответственно для интегрирования вырезается средняя, наиболее устойчивая часть знака, т. е. производится предварительное стробирование [17].

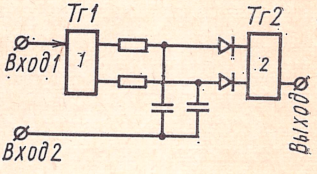


Рис. 1.12. Принципиальная схема каскада стробирования

Схема стробирующего каскада регенератора показана на рис. 1.12, а его временна́я диаграмма — на рис. 1.13. Парафазные сигналы, подлежащие регенерации с триггера *Тг1*, подаются через стробирующие *RC*-цепи на запуск выходного триггера *Тг2*, причем импульсы стробирования вводятся с тактовой системы синхронизации. Входные сигналы, содержащие искажения формы (рис. 1.13*а*), стробируются

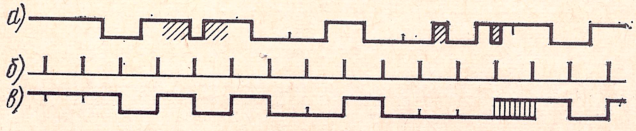


Рис. 1.13. Временна́я диаграмма каскада стробирования

синхроимпульсами (рис. 1.13*б*), так что на выходе каскада регенерации восстанавливается первоначальная форма двоичной последовательности импульсов (рис. 1.13*в*), если, конечно, временны́е искажения (штриховка на рис. 1.13*а*) не превышают исправляющей способности регенератора (50%).

Итак, первое преимущество дискретного способа передачи аналоговых сигналов заключается в повышении помехоустойчивости; второе — в возможности обеспечения конституционных гарантий несогласности передачи сообщений всем потребителям услуг связи. Негласность передачи радиотелефонных сигналов особенно важна, поскольку радиосигналы могут приниматься широким кругом посторонних радиослушателей. Не останавливаясь здесь на специфике проблемы засекречивания речи, отметим лишь, что шифрование дискретных сигналов обеспечивает более высокую стойкость и помехоустойчивость, чем аналоговые методы. Принцип шифровки-дешифровки двоичных сигналов иллюстрируется рис. 1.14, причем рис. 1.14*а* (А) показывает

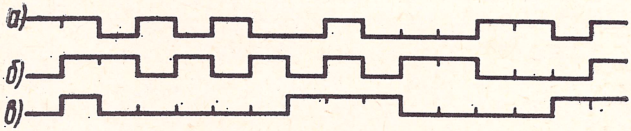


Рис. 1.14. Временна́я диаграмма процесса шифрования сигналов

шифруемые информационные сигналы, а рис. 1.14*б* (Б) — двоичные сигналы шифра, синфазные с информационными сигналами. Сам процесс шифрования заключается в поэлементном перемножении по модулю информационных и шифрующих сигналов [18]. В результате (см. рис. 1.14*в*) формируется двоичная последовательность зашифрованных импульсов, полярность каждого из которых определяется по закону равнозначности $b = a \backsim б$. Соответственно дешифровка сигналов выполняется при наличии у корреспондента синфазной последовательности импульсов шифрования (рис. 1.14*б*). Операция дешифровки заключается в перемножении по модулю зашифрованных, полученных с канала связи, сигналов (рис. 1.14*в*) на двоичные сигналы шифра (рис. 1.14*б*):

$$a = б \backsim в.$$

В табл. 1.4 показано правило шифровки-дешифровки дискретных сигналов.

Высокая стойкость засекречивания речи, определяемая длительностью периода повторения шифрующей последовательности и структурой шифруемой информации, является основным достоинством данного метода. Таким образом, возможность ретрансляции засекречивания двоичных сигналов определяет целесообразность временно́го квантования речи. Следствием ука-

занных преимуществ является возможность введения цифровых (дискретных) звуковых каналов в перспективные цифровые сети связи, в которых все виды сообщений — от телеграфа до телевидения — могут передаваться в дискретной форме.

ТАБЛИЦА 1.4

Номер	Шифровка			Дешифровка		
	а	*б*	*в*	*б*	*в*	*а*
1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	0	0	0	1
3	0	1	0	1	0	0
4	0	0	1	0	1	0

Для того чтобы реализовать указанные возможности, необходимо выбрать такие методы дискретизации речи, которые могут обеспечить минимальные затраты в пропускной способности систем связи при условии сохранения качества звучания, допустимого для разных конкретных случаев. Простейшим методом является квантование клиппированной речи, реализуемое посредством схемы регенератора (рис. 1.12), в котором на вход *1* поступают клиппированные сигналы речи, а на вход *2* — импульсы квантования, частота которых определяется допустимыми потерями в артикуляции. Исследование по временно́му квантованию клиппированной речи свидетельствует о том, что удовлетворительное качество и высокая разборчивость, исключающая заметность квантования слушателем, достигаются при частоте квантования около 10 000 имп/с [19]. При снижении частоты квантования разборчивость падает, а качество речи снижается, так как подчеркивается шум клиппирования:

Частота квантования, дв. ед/с . . 10000 5000 3000
Словесная артикуляция, % . . . 95 до 65

Дальнейшее сокращение числа квантующих импульсов при сохранении приемлемого качества звучания, пригодного для служебной связи и даже для коммерческой радиотелефонии, возможно при использовании метода управляемого компандирования речи. В этом случае компрессированный сигнал квантуется по времени, а управляющий сигнал передается на прием в виде двоичных сигналов (методом импульсной модуляции) так, что экспандер на приеме управляется сигналами восстановленной огибающей речи. Такой «цифровой» управляемый компандер позволяет избежать нелинейных помех, свойственных клиппированию, и обеспечить подавление шума квантования в паузах.

Схема квантователя компрессированных сигналов показана на рис. 1.15. Она подобна регенератору (рис. 1.11) и подключается к выходу компрессора *К*. Квантующие сигналы поступают

на емкостный вход и стробируют полярности звуковых сигналов, обеспечивая переход триггера из одного устойчивого состояния в другое. С выхода триггера *Тг* поступают двоичные звуковые сигналы с частотой манипуляции, обусловленной частотой импульсов квантования.

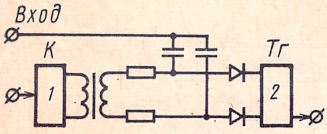


Рис. 1.15. Схема квантователя компрессированных сигналов

Метод передачи квантованной речи с управляемым компандированием иллюстрируется рис. 1.16. Речевые сигналы поступают на компрессор *1*, к выходу которого подключен квантователь *2*; с выхода квантователя двоичные сигналы поданы на распределитель импульсов *3*, совмещающий в единую двоичную последовательность звуковые и управляющие сигналы. В подканале управления включены детектор огибающей *4* и кодовый манипулятор *5*, преобразующий аналоговые управляющие сигналы в дискретные

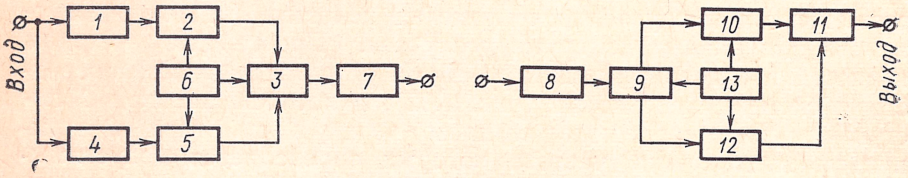


Рис. 1.16. Структурная схема системы передачи квантованной речи

[19]. Генератор *6* позволяет синхронизировать звуковые и управляющие сигналы, а также работу распределителя, который может выполнять функции засекречивающего устройства. Выходные сигналы распределителя поступают в модем *7* и далее транслируются в стандартном ТЧ канале. Сигналы с приемной части модема *8* поступают на распределитель *9*, дешифруются и разветвляются на звуковой и управляющий подканалы. В звуковом канале интегратор *10* преобразует двоичные сигналы в синусоидальную форму и задерживает их во времени для согласования с управляющим сигналом.

На входы экспандера *11* поступают звуковой сигнал постоянного уровня и управляющий сигнал с демодулятора *12*. С выхода экспандера выводится речевой сигнал с исходным динамическим диапазоном.

В результате экспериментов установлено, что для передачи сигналов управляемого компандера необходимо не менее 4800 дв. ед/с. Эта величина соответствует пропускной способности телефонного цифрового радиоканала высшего класса [21, 22, 23].

Дальнейшее сокращение числа двоичных импульсов для передачи речи в цифровой форме при заданном «коммерческом»

качестве достижимо с применением более сложных методов управляемого компандирования частотного спектра звуковых сигналов.

1.6. ЧАСТОТНОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ РЕЧИ

Частотное ограничение речевых сигналов (так же, как и амплитудное) предусматривает сокращение энергетических затрат на передачу информации по каналам связи, что достигается путем согласования структуры сигнала с характеристиками канала связи за счет сокращения избыточности речевого сигнала или допустимого ухудшения звучания естественной речи. Естественный диапазон частот человеческой речи расположен в наиболее чувствительной области восприятия акустических сигналов. Поскольку человеческий слух различает акустические колебания от десятков до десятков тысяч герц, существуют регламентированные МККТТ и МККР нормы на ограничение полосы передаваемых частот для каналов дальней связи (300—3400 Гц), для радиоканалов (250—3000 Гц) и для морской связи (250—2500 Гц). Такое ограничение частотной полосы речевых сигналов позволяет сохранить «коммерческое» качество звучания речевых сообщений и получить выигрыш в помехоустойчивости связи за счет сокращения шумовой полосы приемника.

Многократные исследования показали [163], что в телефонных системах связи, действующих при наличии флуктуационных шумов с равномерной плотностью по частоте, ограничение частотного диапазона полосой в 300—3400 Гц не только не снижает, но, наоборот, повышает разборчивость речи [164].

Кроме того, даже в полосе ТЧ канала существуют особые спектральные области концентрации энергии — форманты, вне которых частичный спектр несет меньшую информационную нагрузку. Поэтому оказалось возможным дальнейшее ограничение полосы частот в каналах, где допустимы определенные потери в качестве речи.

Следует подчеркнуть, что ограничение спектра речи сокращением полосы пропускания естественного сигнала является (как и амплитудное ограничение) процессом необратимым, и внесенные искажения спектра не могут быть скорректированы бесследно.

Попытки дальнейшего сужения полосы частот звукового подканала сверх значений, рекомендованных МККТТ и МККР, показали [24], что разделение спектра звукового сигнала на ряд частотных полос предпочтительнее (в смысле разборчивости) передачи сплошной части спектра той же суммарной ширины, так как в первом случае можно зафиксировать формантные участки полосы, а во втором — часть формант теряется. Так, например, трехканальная передача речи в полосных фильтрах 350—650, 1350—1650 и 2350—2650 Гц (3×300 Гц) обеспечивает высшую разборчивость речи (слоговая артикуляция — $53{,}4\pm3{,}2\%$)

по сравнению с одноканальным частотным ограничителем низких частот при полосе среза 1200 Гц (слоговая разборчивость — 45,6±2,8%).

Разборчивость речи для трехканального варианта существенно повышается при «восстановлении» исключенных частей спектра, т. е. при введении в отсутствующих сигнальных частотных интервалах, преобразованных по частоте речевых сигналов, принятых в трех указанных фильтрах — с 53,4% до 58,1%. Таким образом, дополнительным уплотнением канала ТЧ можно утроить его пропускную способность. При этом дополнительные речевые сигналы на передаче формируются аналогично, а затем транспонируются на соответствующие участки телефонного канала, с тем чтобы на приеме посредством обратного преобразования можно было восстановить сигнал в исходной полосе частот [24].

Сказанное выше подтверждается экспериментом, выполненным с применением набора полосовых фильтров системы тонального телеграфирования [25]. Сопоставление качества передаваемой в нечетных и четных фильтрах этой системы речи показывает, что естественность передачи различных голосов выше в системе с «нечетными» фильтрами, так как сохраняется первый — низкочастотный — участок спектра. Кроме того, оказалось, что увеличение числа фильтров, распределенных в полосе канала ТЧ, улучшает разборчивость.

Этот эксперимент позволяет также сделать вывод о том, что на базе «гребенчатых» каналов ТЧ возможна организация телефонно-телеграфной связи для одновременной передачи речи и данных в аппаратуре тонального телеграфа. Нечетные каналы выделяются для передачи телефонных сообщений, а четные каналы могут использоваться по своему прямому назначению — для передачи двоичных сигналов. Такие «совмещенные» телефонно-телеграфные модемы могут найти применение в организации выделенных линий связи в автоматизированных системах управления (АСУ), в системах сбора данных, в производственной связи и т. д. При использовании телефонно-телеграфного модема может быть организовано наряду с речевым каналом дополнительно 12 независимых телеграфных каналов со скоростью манипуляции до 50 Бод в каждом [26]. Методы ограничения речевой полосы частот в стандартном телефонном канале для дополнительной передачи данных находят применение в технике связи [27] и перспективны в технике автоматического сбора данных с рассредоточенных управляемых объектов АСУ [28, 29].

Структурная схема телефонно-телеграфного модема с ограничением спектра речи и управляемым компандированием (рис. 1.17) иллюстрирует последовательность преобразования сигналов на передающей и приемной сторонах линии связи. Речевой сигнал поступает на вход управляемого компрессора *1*, который обеспечивает согласование канала связи с телефонным абонентом по уровням, а также обеспечивает преобразование

речевого сигнала с улучшенным соотношением сигнал/помеха. Компрессированный речевой сигнал поступает на все нечетные фильтры системы тонального телеграфирования *2* и с выходов этих фильтров через групповое оборудование *5* стандартной системы поступает в канал ТЧ. Первый четный фильтр системы ТТ

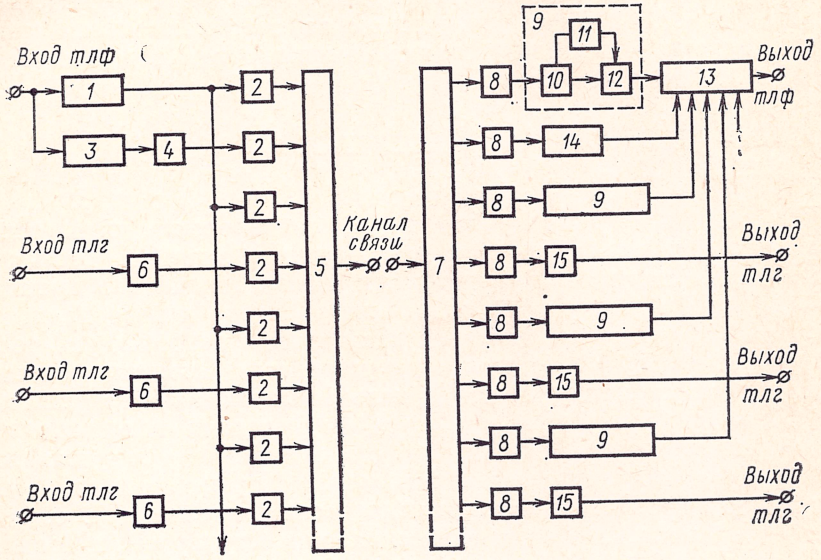


Рис. 1.17. Структурная схема модема с ограничением спектра речи

(или любой другой) может использоваться для передачи управляющих сигналов речевого компандера. Эти сигналы формируются детектором огибающей речи *3* и частотным модулятором *4*. Остальные четные фильтры системы ТТ обеспечивают ввод телеграфных сигналов в частотные подканалы системы, полоса которых не используется для передачи речи. Элементами ввода являются стандартные частотные манипуляторы системы тонального телеграфа *6*.

На приеме речевые и телеграфные сигналы усиливаются линейно в стандартном групповом оборудовании *7* и расфильтровываются поканально фильтрами *8* системы тонального телеграфа. Выходы нечетных канальных фильтров подключаются к канальным приемникам *9*, в состав каждого из которых входят неуправляемый компрессор *10*, обеспечивающий постоянство уровней канальных сигналов перед их совместной обработкой в экспандере *13*, восстановитель *11* и двухканальный фильтр *12*, которые обеспечивают формирование спектра нечетных полосовых участков, вырезанных из речевого сигнала на передаче. Выходы всех канальных приемников *9* подключены ко входу управляемого экспандера *13*, так что экспандер обрабатывает полный спектр телефонного сообщения. Сигнал управления экспандером

поступает из подканала системы с выхода частотного демодулятора *14*.

Вывод телеграфных сигналов производится со стандартных частотных детекторов *15* системы тонального телеграфирования.

Преимущество подобной системы заключается в мобильности организации телефонно-телеграфной связи при улучшенном качестве передачи речи, достигаемом за счет применения метода управляемого компандирования совместно с методом ограничения спектра речи.

1.7. КОМПАНДИРОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА РЕЧИ

Как и амплитудное, частотное компандирование речи основано на нелинейных операциях компрессии и экспандирования с взаимообратимыми характеристиками, позволяющими, в принципе, осуществить такое преобразование спектров передаваемых и принимаемых сигналов, чтобы восстановить разборчивую речь.

Принципиальным отличием устройств компандирования спектра речи является то, что с целью максимального сжатия частотного диапазона отказываются от передачи исходного естественного речевого сигнала или его элементов, ограничиваясь трансляцией в канале связи специальных сигнал-параметров, управляющих процессом воссоздания «синтетической», т. е. искусственной речи из ограниченного набора регулируемых тональных и шумовых электрических сигналов. Сигнал-параметры несут информацию о медленных изменениях интенсивностей текущего спектра речи, об изменениях тональности и чередовании тональных и шумовых звуков.

Поскольку передача управляющих сигнал-параметров занимает полосу частот много меньшую, чем естественный речевой сигнал, частотные управляемые компандеры (вокодеры) позволяют обеспечить существенное (до десяти раз) сжатие частотного диапазона речи. Само слово «вокодер» (Voice and coder») подчеркивает, что речь кодируется, т. е. обеспечивается перевод речевой (аналоговой) информации в дискретную форму для целей помехоустойчивой и засекреченной связи. Естественно, что подобные свойства вокодерной телефонии особенно важны для организации радиолиний. Методы и техника синтетической телефонии за последние 40 лет совершенствовались очень интенсивно, однако проблемы, возникающие при анализе, синтезе и восприятии речи, оказались настолько сложными, что несмотря на обилие оригинальных решений вокодеры пока не вышли из стадии опытной эксплуатации на коммерческих линиях связи, хотя в некоторых специальных условиях они эксплуатируются давно и весьма эффективно [6, 7, 19].

Не останавливаясь на особенностях различных вокодерных систем и их функциональных элементах, рассмотрим структурную схему вокодера (рис. 1.18), поясняющую принцип действия

и общие признаки метода синтетической телефонии. Анализ специфики и возможностей вокодеров необходим для сознательного выбора методов передачи речевых сигналов на линиях связи различного назначения или разных классов качества.

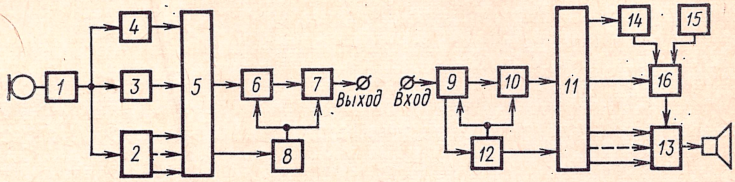


Рис. 1.18. Структурная схема вокодера с модемом

Общей особенностью вокодеров является то, что вместо передачи естественных (пусть даже деформированных) частотных амплитудных и временны́х элементов речи передаются лишь основные сведения об изменении этих элементов, выявленные в соответствии с тем или иным методом анализа — синтеза речи. Отсюда следует, что чем шире полоса частот исходного речевого «материала» (т. е. чем больше сохранено естественных признаков речи), тем больше шансов повысить качество искусственной речи.

Обычно на входе вокодера включается качественный микрофон и речевой сигнал анализируется в полосе 0—5000 Гц. Следовательно диктор-абонент вокодерной системы связи должен находиться вблизи микрофона и включение вокодера в коммутируемую сеть телефонных каналов остается нерешенной проблемой.

Поэтому вокодеры пока находят применение либо в командных (правительственных) системах связи, где важность коммуникации определяет целесообразность создания особых абонентских сетей, либо в условиях служебной связи, где диктор работает с микрофоном (например подвижная радиосвязь). Кроме того, по тем же причинам ограничения естественного спектра речи для работы с вокодером нельзя использовать угольный микрофон, который повсеместно эксплуатируется в телефонных каналах, полоса которых ограничена значениями 300—3400 Гц или 250—3000 Гц.

Итак, в вокодере динамический или электромагнитный микрофон (см. рис. 1.18) подключен к высококачественному микрофонному усилителю *1* с частотной коррекцией. Речевые сигналы с усилителя *1* поступают в три основных блока вокодера. В блоке анализа текущего спектра речи *2* выполняются функции спектрального разложения речевого сигнала на узкополосные составляющие и измерения интенсивностей этих составляющих. В состав анализатора *2* входят параллельно включенные цепочки частотных фильтров и детекторов огибающих в полосных или формантных [30] вокодерах или элементы задержки и детекторы

отсчетов в ортогональных вокодерах [31]. Способы анализа обычно выбираются так, чтобы улучшить качество синтеза речи или увеличить коэффициент компандирования спектра или из конструктивных соображений. Скорость анализа текущего спектра речи не превышает 25—50 Гц. Количество выходов анализатора определяется числом ветвей спектрального анализа и обычно обеспечивает вывод около десятка сигнал-параметров.

Речевые сигналы поступают также на блок выделения основного тона речи *4*. Под выделением основного тона речи понимают автоматическую регистрацию мгновенной частоты акустических колебаний, индивидуальной для речевого аппарата каждого человека.

Известно, что основной тон речи определяется «конструкцией» голосовых связок, и поэтому он различен для мужчин от 70—120 Гц до 150—160 Гц и женщин — от 180—220 Гц до 300—330 Гц [32].

Проблема выделения основного тона, необходимого для синтеза искусственного голоса, заключается в том, что регистрация должна производиться в реальном времени, поскольку основной тон речи не остается постоянным даже в пределах одной фразы (например, формирование вопросительной фразы). Основной тон речи может меняться плавно и скачкообразно в зависимости от структуры звука (например, при переходе от гласных к согласным). Соответственно необходимо неискаженное воспроизведение изменений высоты тональности анализируемых звуков в приемной части вокодера — синтезатора. Измерение и воспроизведение высоты тона выполняется с неизбежными потерями мелких и быстрых колебаний голосовых связок, что ведет к потере естественности звучания синтезированной речи.

Если использование динамического микрофона и низкочастотной части спектра речи еще дает возможности повышения натуральности искусственного голоса, то при применении угольного микрофона необходимо смириться с потерями в качестве речи и усложнениями в аппаратуре. Во всяком случае, проблема анализа и синтеза основного тона не имеет типового решения [6, 7].

На передачу сигналов основного тона обычно выделяется полоса 50—300 Гц.

Третьим блоком анализа речевых сигналов является блок выделения сигналов «тон — шум — пауза» *3*, предназначенный для обозначения моментов синтеза тональных или шумовых звуков. Задача автоматического разделения тональных и шумовых сигналов близка проблеме выделения основного тона речи, так как при выделении сигналов основного тона нетрудно обнаружить шумовые сигналы, например по различию частотных спектров. Наоборот, по выделенным сигналам «тон — шум» можно определить период основного тона, что достигается анализом вторичного спектра коротких отрезков речевого сигнала (вторичным называют логарифмированный спектр речевых отрез-

ков, т. е. обработанный с учетом закона слухового восприятия).

При передаче звонких звуков вторичный спектр содержит пики, временно́е положение которых характеризует период основного тона речи. Возможны комбинации различных методов выделения сигналов «тон — шум — пауза», в том числе с учетом статистики взаимодействия этих сигналов в речи [6].

В условиях выхода на коммутируемую сеть эта проблема осложняется из-за наличия шумов в абонентских соединительных линиях. Поэтому задача надежного и своевременного разделения звонких и глухих звуков и опознавания паузы не имеет однозначного решения [6].

Выходные сигналы анализатора спектра речи *2,* выделителя сигналов «тон — шум — пауза» *3* и выделителя основного тона *4* поступают в виде аналоговых сигналов постоянного тока на многоканальный преобразователь «аналог-цифра» *5*, обеспечивающий дискретизацию сигнал-параметров. С выхода преобразователя *5* следуют модулированные по амплитуде импульсы, которые в импульсно-кодовом модуляторе *6* преобразуются в синхронную последовательность двоичных (телеграфных) сигналов. В зависимости от назначения вокодера и требуемого качества синтеза речи скорость манипуляции на выходе ИКМ манипулятора *6* может составлять 1200, 2400 или 4800 бит/с. Увеличение пропускной способности канала связи необходимо по мере повышения требований к качеству воспроизведения и натуральности речи. Так, при скорости 1200 бит/с достигается достаточная для служебной связи разборчивость, а при скорости 4800 бит/с может быть обеспечена такая натуральность речи, при которой возможна узнаваемость собеседника.

Увеличение скорости при этом необходимо для более подробного описания сигнал-параметров основного тона речи.

В соответствии со скоростью выдачи двоичных сигналов с ИКМ модулятора *6* выбирается тип модема *2,* обеспечивающего трансляцию импульсных сигналов в стандартном телефонном канале тональных частот. При передаче сигналов по высококачественным системам связи или на небольшие расстояния могут использоваться одноканальные модемы, в которых производится фазовая манипуляция несущего колебания, размещенного в средней части полосы канала (обычно 1800 Гц). При необходимости передачи вокодерных сигналов по каналам с большим уровнем помех или по каналам с многолучевым распространением одноканальный модем неприменим ввиду малой длительности времени передачи бинарного знака. В этих случаях следует применять многоканальные модемы тонального телеграфирования [4]. Синхронность работы преобразователя *5,* ИКМ модулятора *6* и передающей части модема *7* обеспечивает синхрогенератор *8.*

Поступающие с канала связи фазоманипулированные сигналы демодулируются в приемной части модема *9* и подаются на ИКМ демодулятор *10,* с выхода которого снимаются аналого-

вые сигнал-параметры, управляющие синтезом речи. Преобразователь *11* выполняет функции распределения одноканальных сигналов по цепям управления синтезатором речи, в состав которого входят генератор основного тона *14*, коммутатор «тон — шум — пауза» *16* и собственно блок синтеза *13*. Функциональные блоки обработки принимаемых сигналов *9—11* объединены цепями тактовой и цикловой синхронизации, которые подключены к соответствующим выходам синхронизатора *12*. (Синхронизатор может входить в состав модема, поскольку обеспечивает процесс синхронной демодуляции, однако функционально задача синхронизации должна быть выделена.)

Генератор основного тона *14* представляет собой источник возбуждаемых тональных сигналов, управляемый сигнал-параметрами выделителя основного тона *6*, а генератор шума *15* выполняет функции имитации низкочастотных составляющих шумовых звуков речи.

В соответствии с временными моментами существования тональных или шумовых сигналов в передаваемой речи блок коммутации *16* пропускает на вход блока синтеза *13* сигналы с выходов генератора основного тона *14* или генератора шума *15*. Сам блок синтеза представляет собой четырехполюсник с управляемой амплитудно-частотной характеристикой, причем АЧХ изменяется посредством воздействия принятых сигнал-параметров так, чтобы как можно ближе соответствовать спектральной огибающей речи, измеренной на передаче анализатором *2*.

Синтезированная искусственно речь получается на выходе четырехполюсника — синтезатора *13*. На основе отечественной системы ортогонального синтеза речи [6] получены высокие результаты как в смысле натуральности речи, так и в смысле технологичности, так как ортогональные синтезаторы выполняются на базе дискретных линий задержки. Преимущество ортогональных методов анализа — синтеза речи перед полосными состоит в возможности достижения высшей точности процессов анализа и синтеза огибающей мгновенного спектра речевого сигнала. В ортогональных вокодерах частоты формантных максимумов синтезируемого спектра непрерывно управляются сигнал-параметрами, передаваемыми с анализатора спектра, причем локализация управления на узких участках частотной оси обеспечивает необходимое качество восстановленной речи.

На базе модели, представляющей речевой тракт в виде многополосного фильтра с переменными параметрами, получили развитие вокодеры с «предсказанием» [33]. Параметры «предсказателя»— рекурсивного фильтра — выбирают так, чтобы его импульсный отклик описывал речевой сигнал на интервале анализа. Коэффициенты фильтрации определяют в результате анализа проб речевого сигнала, минимизируя среднеквадратичную ошибку. Для получения синтезированной речи хорошего качества число коэффициентов предсказателя не должно быть менее 10—12.

Известны и цифровые адаптивные вокодеры. Так, система VADAK («Voice Analyzer and Date Converter») обеспечивает сжатие речевого сигнала, предварительно преобразованного в цифровую форму (7000 отсчетов в 1 с, восьмизначный код с линейным квантованием). Этот вокодер [34] построен по принципу полосного, но в нем по-новому решен ряд задач, которые трудно решить аналоговыми методами. В результате точность синтеза возрастает; обеспечиваются передача быстрых переходов второй и третьей формант, изменение полосы пропускания фильтров, подстройка под голос диктора (включая и женский голос).

Вокодер VADAK работает в канале связи с полосой 3,5 кГц, обеспечивает выходную скорость 2400 Бод и высокие параметры восстановления речи: точность передачи формант по частоте 3—5%, по уровню приблизительно 1,3 дБ, по полосе 10—20%, по основному тону 0,3—0,5% (в полосе частот 67—333 Гц).

Однако вокодерные методы анализа — синтеза принципиально не могут восстановить естественную структуру исходного речевого сигнала, поскольку мелкие и быстрые изменения формы частотных составляющих речевых сигналов не могут быть переданы сравнительно медленными управляющими сигналами, а синтезированные фазовые соотношения отдельных составляющих спектров не тождественны естественным соотношениям [34]. Поэтому путь развития синтетических методов разветвился на два перспективных направления, первое из которых направлено на максимальное сжатие передаваемых в линии связи сигналов без стремления к сохранению естественных звуков искусственной речи, а второе ставит своей целью сохранение естественности звучания при возможном сжатии спектра передаваемых звуковых сигналов.

Первое направление представлено фонетической теорией речи [6], согласно которой фонетические элементы речи (фонема — наименьшая звуковая единица данного языка) полностью определяются законом изменения спектров во времени. Соответственно принцип действия фонемного вокодера состоит в том, что производится непрерывное автоматическое отождествление анализируемых звуков речи с алфавитом возможных фонем языка, результаты которого передаются в виде кодовых комбинаций в канале связи и являются сигнал-параметрами, управляющими процессом синтеза образуемых фонем искусственной речи. Ожидается, что фонемные вокодеры позволят воссоздать разборчивую речь по каналу связи с полосой 30—50 Гц, т. е может быть обеспечено сжатие речи до 50 раз [35]. Конечно, «фонемная речь» не может сохранить индивидуальность диктора, но в ряде перспективных систем информационного обслуживания натуральность (узнаваемость) речи не требуется. Это относится, например, к информационно-поисковым системам, входящим в состав АСУ массового обслуживания с речевым ответом [36].

Второе направление представлено полувокодерами, которые обеспечивают сокращение спектра речи лишь в 3—5 раз, но при восстановлении качества звуковых программ, близкого к исходному. Полувокодер отличается от вокодера тем, что низкочастотная часть звукового спектра, несущая основную информацию о высоте тональности и сведения о чередовании сигналов «тон — шум — пауза», передается по каналу связи без сжатия, т. е. в естественном виде. Синтезируется же только высокочастотная часть спектра, причем на основе анализа принятого естественного низкочастотного участка полосы частот. Обычно этот участок занимает 300—900 Гц, а выше — в полосе 900—1300 Гц передаются вокодерные сигнал-параметры, полученные при анализе высокочастотного участка звуков.

Таким образом, решается основная проблема повышения качества синтезируемых звуков, возникающая с появлением вокодера. Решается также и проблема работы в коммутируемой сети с угольным микрофоном.

Следовательно, полувокодер может успешно использоваться как в технике телефонной связи для уплотнения ТЧ каналов во всех звеньях телефонной сети [37], так и в технике радиовещания для передачи программ вещания из студий к радиостанциям [38].

Структурная схема полувокодера показана на рис. 1.19. Звуковые сигналы поступают на вход усилителя с частотной кор-

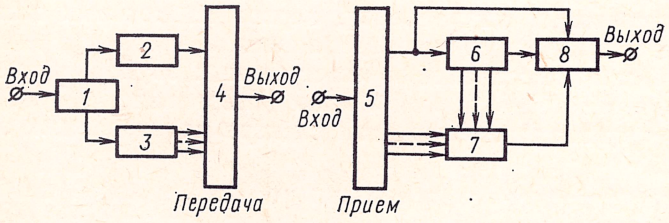


Рис. 1.19. Структурная схема полувокодера

рекцией *1*. Иногда в состав усилителя входит амплитудный компрессор (тогда на выходе приемной части полувокодера включается экспандер). К выходу усилителя *1* подключены блок выделения спектра *3*, предназначенный для передачи низкочастотного участка естественного спектра частот (300—900 Гц), и блок анализа спектра *3*, обеспечивающий вокодерную обработку высокочастотной части спектра (900—1300 Гц — в телефонии), причем обычно формируется до десяти управляющих сигнал-параметров, передаваемых методом частотного уплотнения на частотах выше 900 Гц, так что суммарная полоса телефонного канала не превышает 300—1275 Гц. Линейное сложение низкочастотных и высокочастотных сигналов производится в суммирующем усилителе *4*. На приеме включается разделительный

блок *5*, обеспечивающий расфильтровку подканалов, необходимую для синтеза звуков. Естественный участок спектра подается на выравниватель *6*, который представляет собой широкополосное нелинейное устройство с выравнивателем мощности отдельных спектральных составляющих. При выравнивании «расширенного» спектра последний сохраняет как информацию «тон — шум — пауза», так и информацию о частоте основного тона. Тонкая временна́я структура голосового возбуждения также сохраняется. Таким образом, удается получить сигналы возбуждения синтезатора *7*, которые управляются по уровню соответствующими сигнал-параметрами, доставленными по управляющим подканалам с анализатора *3*.

Низкочастотный (естественный) участок спектра суммируется в линейном усилителе *8* с выходными сигналами синтезатора *7*, воссоздающими высокочастотную часть звукового сигнала. При этом обеспечивается высокая разборчивость телефонного сигнала, а качество уплотненного канала почти неотличимо от стандартного телефонного канала.

Следует отметить, что управляемое амплитудное компандирование в области методов частотной компрессии еще не используется. Видимо, это объясняется тем, что вокодеры лишь начинают применяться в коммерческой телефонии, и задача совмещения их с управляемыми компандерами будет решена как одна из задач проблемы коммутируемой сети.

1.8. МОДЕМЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВОКОДЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Поскольку основным достоинством вокодеров является возможность преобразования речевых сигналов в двоичную последовательность импульсов, возникает необходимость в модеме (модуляторе-демодуляторе) для передачи этих сигналов по телефонным каналам связи. Правда, для ввода дискретных вокодерных сигналов в цифровые системы связи (в системы с импульсно-кодовой или дельта-модуляцией) дополнительных модемов не требуется, но трансляция вокодерных сигналов в стандартных ТЧ каналах ЕАСС без модема невозможна.

Структурная схема вокодерного модема показана на рис. 1.20. Анализатор вокодера *1* формирует на выходе последовательность изохронных двоичных сигналов со скоростями 1200, 2400 или 4800 бит/с в зависимости от требуемой натуральности

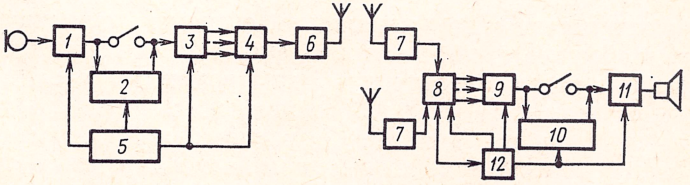


Рис. 1.20. Структурная схема вокодерного модема

синтезируемой речи. Эта последовательность импульсов поступает в шифратор *2*, где производится засекречивание речевых сигналов путем их алгебраического поэлементного перемножения с шифрующей последовательностью двоичных сигналов, синхронной и синфазной с речевыми сигналами. Зашифрованный сигнал поступает на трансформатор скоростей, расщепитель *3* которого производит преобразование одноканального импульсного сигнала в синхронно-синфазные многоканальные сигналы [4]. Такое преобразование последовательного кода в параллельный необходимо, чтобы сигналы можно было передавать в каналах с многолучевым распространением, где временные сдвиги могут достигать величины 3 мс. Обычно скорость манипуляции в таких каналах выбирается не более 100—200 Бод, и, следовательно, число параллельных каналов в модеме и соответственно коэффициент трансформации скоростей определяются отношением

$$A = V/V_{м},$$

где V — информационная скорость вокодера (1200; 2400; 4800 бит/с), а $V_{м}$ — скорость манипуляции в канале связи.

Обычно число подканалов модема выбирают в пределах 12—20 [23]. Многоканальные синфазные сигналы с расщепителя *3* подаются на манипуляторы *4*, которые обеспечивают фазовую манипуляцию соответствующих поднесущих канальных частот. Обычно используется двухкратная фазовая манипуляция с фазовым сдвигом 90° и градациями фазы 45°, 135°, 225°, 315°. Выбор градаций фазы, кратных 45°, позволяет минимизировать пик-фактор фазоманипулированного сигнала, так как амплитудные нестационары в этом случае наименьшие. Манипуляция осуществляется методом «вращающейся фазы», что позволяет избежать передачи длинных «нулевых» последовательностей, т. е. сигналов типа «нажатие — отжатие» во время пауз в речи и облегчить, таким образом, условия синхронизации приемного полукомплекта [39].

Синхронизация узлов формирования дискретных сигналов в вокодере *1*, фазирование последовательностей импульсов в шифраторе *2*, преобразование последовательного кода в параллельный в расщепителе *3*, а также синфазная двухкратная фазовая манипуляция в манипуляторе *4* обеспечиваются за счет формирования соответствующих синхросигналов, синфазных синхропоследовательностей и поднесущих частот в спектре ТЧ канала синхрогенератором *5*.

Фазоманипулированные канальные сигналы суммируются в линейном усилителе и по соединительной линии направляются к однополосному радиопередатчику *6* или коммутируются в любой телефонный канал связи ЕАСС. Радиосигналы принимаются однополосными радиоприемниками *7*, число которых соответствует числу ветвей разнесенного приема и может изменяться от одного (при разнесении по частоте, например, при передаче по двум независимым боковым) до нескольких (разнесение по простран-

ству, поляризации, азимуту, углу излучения и т. д.). Обычно используются стандартные приемные устройства магистральной связи [40], а суммирование разнесенных сигналов производится в демодуляторе *8* модема.

Демодулятор *8* обеспечивает раздельное фазовое детектирование многоканальных фазоманипулированных сигналов, сложение разнесенных сигналов в каждом подканале и синхронную регенерацию сигналов. С выходов демодулятора *8* следуют синфазные двоичные последовательности импульсов, которые поступают на приемную часть трансформатора скоростей — собиратель *9*, преобразующий многоканальные двоичные сигналы в одноканальную последовательность импульсов, т. е. обеспечивающий преобразование параллельного кода в последовательный. Далее, в дешифраторе *10* сигнальная последовательность поэлементно перемножается с шифрующей последовательностью, аналогичной той, которая использовалась на передаче, и синфазной с ней. В результате с выхода дешифратора *10* поступает двоичная последовательность импульсов, содержащая сигналы управления синтезатором вокодера *11*.

Синтезатор *12* обеспечивает временно́е взаимодействие узлов детектирования и регенерации многоканальных сигналов в демодуляторе *8*, преобразование параллельного кода в последовательный в собирателе *9*, временно́е совмещение дешифруемой последовательности сигналов с шифром в дешифраторе *10* и, наконец, разделение управляющих многоканальных сигналов синтезатора в вокодере *11*.

Входным сигналом синхронизатора могут служить выделенные тем или иным способом фронты фазоманипулированных сигналов всех подканалов модема. Из импульсов, временно́е положение которых соответствует фронтам манипуляции, формируются синхросигналы, временно́е положение которых соответствует усредненному положению фронтов, следующих со скоростью манипуляции (т. е. временно́е положение синхросигналов определяется математическим ожиданием функции распределения принятых фронтов сигнала, флуктуирующих под воздействием случайных помех в канале связи).

Следует отметить, что в тех случаях, когда не требуется засекречивание сообщений, негласность переговоров, гарантируемая администрацией связи абонентам, может достигаться только за счет применения модема тонального телеграфирования, ибо радиослушатель, имеющий только приемник, не может распознать речь, передаваемую в телефонном канале связи, которая на слух неотличима от «рычания» тонального телеграфа. Повышение «стойкости» негласности достигается синхронной коммутацией сигналов на входах модулятора *4* и выходах демодулятора *8*, которая может производиться периодически, например, каждый сеанс связи или для каждого телефонного разговора.

Особенность модемов, используемых для передачи речевой информации, заключается в том, что необходима высокая про-

пускная способность (1200—9600 бит/с). Поэтому единственным перспективным видом модуляции является фазовая. Важно отметить, что помехоустойчивость фазовой манипуляции в каналах с многолучевостью существенно выше помехоустойчивости узкополосной частотной манипуляции. Говоря о помехоустойчивости телефонной радиосвязи, следует отметить, что речевой сигнал, даже обработанный в анализаторе вокодера, отличается громадной смысловой избыточностью, а регистратором является такой «оптимальный приемник», как слуховой аппарат и мозг человека, причем в процессе речевой связи ведется диалог, т. е. возможен переспрос непонятных слов или фраз. Поэтому к модему вокодера не предъявляется требований обеспечения высокой помехоустойчивости, и радиосвязь возможна в условиях, когда вероятность ошибок составляет $1 \cdot 10^{-3}$ и даже $1 \cdot 10^{-2}$ на бинарный знак. При этом слушатель не ощущает «радиоакцента», т. е. присутствия помех соседних радиостанций, замираний или шумов. Специфические искажения речи, снижающие разборчивость, проявляются лишь при нарушениях синхронизма в модеме, и поэтому на помехоустойчивость системы синхронизации в модемах речевой связи должно обращаться особое внимание.

Испытания вокодерных магистральных радиолиний показывают, что речевая связь остается приемлемой в 90% времени эксплуатации радиолинии по расписанию.

Важно отметить, что помехоустойчивость вокодерных линий связи может быть повышена за счет введения в модем элементов адаптации по качеству связи. При таком сопряжении подканалов вокодера и модема, когда при наличии помех в одном из подканалов модема он бы выключался из управления синтезатором, возможно обеспечить режим исключения узкополосных «телеграфных» помех. Возможны также режим регистрации групповых ошибок и запрещение управления синтезатором во время действия пакетов ошибок, с тем чтобы управление синтезом в это время осуществлялось от соседнего подканала вокодера. В этих случаях используется свойство высокой коррелированности изменений сигнал-параметров вокодера [4], позволяющее временно заменять один сигнал-параметр другим.

Таким образом, в состав модема вокодера не следует вводить специальных устройств защитного кодирования, ограничиваясь автоконтролем качества связи в подканалах модема, что достигается сопоставлением канальных сигналов с синхросигналами для регистрации фазовых или временных искажений [5].

В тех случаях, когда вокодерный модем должен использоваться для передачи телеграфных сигналов или машинных данных, к трансформатору скоростей должны подключаться соответствующие устройства защиты от ошибок, применяемые в этих случаях для повышения помехоустойчивости (надежности) радиоприема. В тех случаях, когда требуется передавать вокодерные сигналы в каналах с постоянными параметрами, могут использоваться одноканальные модемы, в которых скоростной сиг-

нал передается на единственной поднесущей, расположенной в центре телефонного канала [42].

Следует подчеркнуть, что многоканальный модем, конечно, дороже одноканального, но он обеспечивает совместимость каналов с постоянными и переменными параметрами и повышенную помехоустойчивость, чего нельзя обеспечить в одноканальном модеме проводной связи. Многоканальные модемы могут быть двух классов: с перекрывающимися и независимыми спектрами [21].

Модемы с перекрывающимися спектрами характеризуются расстановкой поднесущих частот с интервалом $\Delta\omega = 2\pi V_м$. При этом спектральный максимум данного подканала совпадает с минимумами спектральных составляющих других подканалов. Это свойство ортогональности позволяет разделить сигналы отдельных подканалов без полосовых фильтров, однако необходимо использовать кинематические, магнитострикционные, кварцевые или активные фильтры, имеющие характеристику, сопряженную со спектрами сигналов каждого подканала [22].

Многоканальные модемы с перекрывающимися спектрами при двухкратной фазовой манипуляции могут обеспечить передачу одноканального сигнала в стандартном канале со скоростью 4800 бит/с. Однако для использования модема с перекрывающимися спектрами необходимы радиоканалы высшего качества — с линейными фазочастотными характеристиками.

Модемы с перекрывающимися спектрами чувствительны к сосредоточенным помехам, так как подобная помеха поражает несколько подканалов системы.

Таким образом, модем высшего класса, обеспечивающий максимальную пропускную способность, должен использоваться совместно с вокодером высшего класса на радиолиниях лучшего качества.

Вокодеры среднего класса (2400 бит/с) на радиолиниях среднего качества могут работать совместно с модемом среднего класса с независимыми спектрами. Этот модем представляет собой систему тонального телеграфирования, в каждом из подканалов которой осуществляется двухкратная фазовая манипуляция частотнонезависимых поднесущих колебаний, причем спектры канальных сигналов на передаче и приеме разделяются полосовыми фильтрами. В связи с потерями полосы на расфильтровку пропускная способность фильтрового модема ниже, чем модема с перекрывающимися спектрами. Однако требования к качеству канала связи также снижаются, так как желательна линейность частотно-фазовых характеристик лишь в пределах каждого узкополосного канала. Соответственно узкополосные радиопомехи локализуются в одном из подканалов (полоса подканала 300 Гц при затухании 60 дБ). Особенностью «фильтрового» модема является также простота ввода дискретных сигналов от синхронных независимых источников со скоростью до 200 Бод. В модеме применяются синхронное детектирование и

регенерация сигналов, причем основным функциональным элементом в каждом из подканалов модема является дискретная система синхронизации, выполненная на двоичных полупроводниковых элементах [21].

Таким образом, элементная база вокодеров и модемов является общей, что упрощает проектирование систем радиосвязи.

Вместе с тем техно-экономический анализ показывает, что стоимость и мощность модема сравнимы со стоимостью вокодера, а их суммарная стоимость многократно превышает затраты на радиокомпандер. Поэтому вокодерно-модемные системы должны применяться только в тех случаях, которые могут оправдать резкое повышение затрат на оборудование, сравнимое со стоимостью радиосредств.

1.9. ВРЕМЕННО́Е КОМПАНДИРОВАНИЕ РЕЧИ

Временна́я компрессия речи обеспечивает сжатие занимаемого сигналом времени и может применяться как с последующим экспандированием (при восприятии компандированной речи человеком), так и без экспандирования (при вводе речи в различные речеобрабатывающие устройства).

Принцип временно́го компандирования заключается в том, что из звукового сигнала исключаются определенные отрезки, которые затем восстанавливаются при экспандировании [6, 7]. Временна́я компрессия (так же, как амплитудная или частотная) основана на сигнальной избыточности речи и свойствах слуха не замечать небольшие временны́е искажения звуков (до 10 мс). Чаще всего временна́я компрессия используется для уплотнения ТЧ канала дополнительными сигналами — аналоговыми или дискретными, что особенно важно в автоматизированных системах, где необходимы и речевая связь, и передача данных или телеметрических сигналов.

Как обычно, простейшей формой уплотнения ТЧ канала для передачи речевых сигналов является ограничение сигнала, в данном случае временно́е, которое, однако, должно оставаться незаметным для слуха. Иллюстрацией такого метода служит система одновременной передачи речевых сигналов и данных в телефонном канале связи [44], в которой перемежается передача равных по времени отрезков речевого сигнала и сигнала данных. На приемной стороне выделяются сигналы данных, а соответствующие временны́е интервалы в речевом сигнале заполняются вспомогательными сигналами, которые представляют собой предшествующие отрезки речи, задержанные на время передачи данных. Таким образом, задержанные отрезки речи заполняют паузы, образованные для передачи данных, и позволяют сформировать непрерывный речевой сигнал. Частота коммутации «речь — данные» определяется заметностью временны́х искажений речи на слух.

Допускаемая длительность прерывания речевого сигнала составляет 5—20 мс в течение каждых 200—500 мс даже в том случае, когда не применяется временно́е восстановление сигнала [45]. В случае использования компенсирующей задержки пропускная способность канала данных может быть существенно повышена.

Недостатком таких методов временно́го сжатия речевых сигналов является то, что периодические «вырезки» временны́х интервалов производятся безотносительно к наличию или отсутствию речевых сигналов в канале связи. В то же время загрузка ТЧ канала речью неравномерна, так как диалог абонентов, в основном, ведется поочередно, т. е. один говорит, а другой слушает.

Поэтому перспективны такие методы временно́й компрессии, которые позволяют уменьшить как временну́ю избыточность речи, так и использовать паузы речи для передачи дополнительных сигналов.

Возможны методы временно́й компрессии речи, основанные на полном вырезании пауз и частичном — гласных звуков при помощи устройства магнитной записи, лентопротяжный механизм которого управляется самим речевым сигналом (рис. 1.21). Входной сигнал через фильтр *1* (250—6000 Гц) подается на детекторы сигнала *2* и гласных *5*. Детектор огибающей *2* и пороговое устройство *3* формируют сигнал управления лентопротяжным механизмом только при наличии входного сигнала определенного уровня. Детектор гласных *5* подобен детектору сигнала *2*, но на его входе выделяется сигнал в полосе 250—800 Гц фильтром *4*. Выходной сигнал детектора гласных поступает с ограничителя *6* на прерыватель сигнала, который останавливает лентопротяжный механизм *7* на определенное время, вырезая тем самым участки гласных звуков, а затем вновь производит пуск. (Время пуска и остановки лентопротяжного механизма 10—30 мс.)

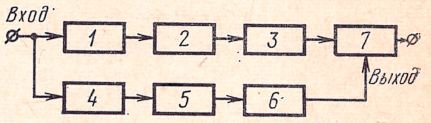


Рис. 1.21. Структурная схема временно́го компрессора речи

Временно́й компрессор требует соответствующего временно́го экспандера, который восстанавливает временно́е положение пауз и гласных звуков, причем если нарушения в восстановлении пауз ведут только к искажению временны́х признаков речи, то погрешности в синтезе гласных звуков нарушают натуральность речи ввиду потери сведений об основном тоне голоса. При передаче сигналов основного тона качество речи можно повысить, но возникают те же проблемы, что и при использовании вокодера (необходимость анализа низкочастотных спектров и т. д.).

Подобный метод временно́й компрессии не позволяет сократить полосу частот, так как необходимо передавать без сжатия взрыв-

ные и шумовые звуки, спектр которых шире спектра гласных, но время передачи речевых сообщений можно, таким образом, сильно уменьшить.

Применительно к системам связи методы временно́й компрессии, по-видимому, малоперспективны ввиду недопустимости задержки сигналов речи в диалоге (эффект пропадания собеседника), однако при разработке систем оповещения, служебной связи или информационного обслуживания они могут найти применение, поскольку позволяют резко уменьшить объем памяти в аппаратуре накопления речевых команд, причем вид накопителей не имеет значения (магнитомеханика или электроника).

Итак, можно сделать вывод о том, что магнитная запись является эффективным средством временно́го компандирования, поскольку скорость воспроизведения может отличаться от скорости записи и наоборот [46].

Методы временно́й компрессии, основанные на прерывании речи, неизбежно сопряжены с искажением огибающей речи, что исключает возможность восстановления высококачественных звуков. Поэтому временна́я компрессия нуждается в восстановлении исходной огибающей речи на приеме сигналов. Метод управляемого амплитудного компандирования позволяет восстановить исходную форму звуковой огибающей и тем самым улучшить качество систем с временны́м компандированием.

Таким образом, системы с деформацией огибающей речи должны дополняться управляемыми компандерами.

Кроме рассмотренных временны́х компандеров, изменяющих «макроструктуру» речевых сигналов, существуют методы изменения «микроструктуры». Так, возможно передавать в канал связи только один полупериод колебаний звуковых частот, восстанавливая второй полупериод на приеме по принятому [47].

Сигнал на передаче (рис. 1.22*а*) подвергается однополупериодному выпрямлению (рис. 1.22*б*), а затем растягивается во времени вдвое (рис. 1.22*в*), после чего каждый второй полупериод инвертируется (рис. 1.22*г*). Этот сигнал, полоса которого примерно в два раза меньше, чем у исходного (рис. 1.22*а*), передается в линию связи. На приеме фиксируются точки перехода сигнала через нуль (рис. 1.22*д*), используемые в качестве импульсов синхронизации, и соответственно восстанавливается сжатый полупериод речевого колебания (рис. 1.22*е*). Затем все полупериоды задерживаются во времени и инвертируются по полярности (рис. 1.22*ж*). Однополупериодные двухпо-

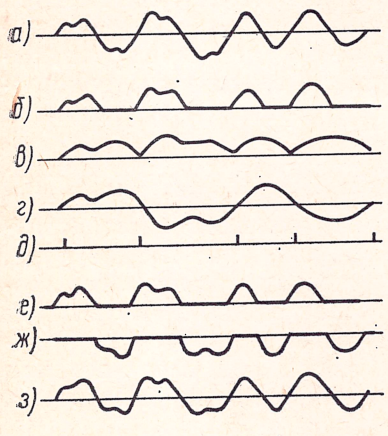


Рис. 1.22. Временна́я диаграмма временно́го компандирования

лярные сигналы (рис. 1.22*е* и *ж*) суммируются, восстанавливая принятый речевой сигнал (рис. 1.22*з*).

Диаграмма свидетельствует о том, что данный метод не позволяет обеспечить временну́ю компрессию более чем в два раза, а также иллюстрирует появление нелинейных искажений, возникающих при погрешностях в обработке сигналов.

Можно заметить, что подобные методы временно́го компандирования тесно смыкаются с методами частотной компрессии, поскольку результирующий эффект заключается в уменьшении требуемой для передачи речи полосы частот.

1.10. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ КОМПАНДИРОВАНИЯ

Анализ основных методов компрессии звуков для передачи их по каналам электросвязи, использования в радиовещании и автоматизированных систем управления показывает, что многообразие методов и различия в условиях их применения требуют определенной классификации (рис. 1.23), направленной на обеспечение выбора оптимального алгоритма обработки звуковых сигналов при проектировании конкретных систем.

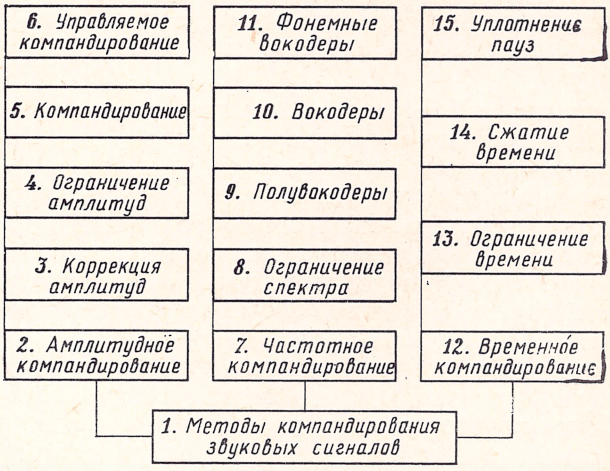


Рис. 1. 23. Классификация методов компандирования звуковых сигналов

Общее техническое направление компрессии звуков разделяется на амплитудное, частотное и временно́е компандирование в соответствии с существующей традицией. Простейшим методом амплитудного регулирования служит коррекция амплитуд, широко используемая в связи и вещании для выравнивания амплитудно-частотной характеристики тракта или повышения эффективности обработки звуков в более сложных системах компрессии.

Метод ограничения амплитуд звуковых сигналов используется либо в системах радиотелефонной связи невысокого качества (подвижная, служебная связь) при реализации предельного ограничения (клиппирования), либо в системах радиовещания для некоторого сокращения пик-фактора сигнала (ограничителя мгновенных значений). Ввиду необратимости процесса ограничения оно не может рекомендоваться для высококачественных систем связи и вещания. Даже системы с управляемым ограничением не обеспечивают «коммерческого» качества звучания.

Поэтому следующим шагом в развитии данного направления явилось компандирование звуков, обеспечивающее обратимость нелинейных характеристик компрессии и экспандирования. Однако недостаточная степень компрессии неуправляемых компандеров и требование постоянства затухания в канале связи, недопустимое в радиоканалах, потребовало дальнейшего совершенствования метода. Наконец, разработка метода управляемого компандирования завершает развитие методов обработки динамического диапазона звуков, обеспечивая передачу их с постоянным уровнем в каналах связи.

Учитывая, что управляемое компандирование может успешно использоваться в каналах связи с постоянным или переменным затуханием, можно сделать вывод о том, что в технике обработки амплитуд звуков существует оптимальный метод передачи сигналов.

Если методы амплитудного компандирования направлены на передачу естественных звуковых сигналов без изменения их спектрального состава, то методы частотного компандирования направлены на максимальное сжатие спектра звуковых сигналов, передаваемых в каналах связи. Наибольшая степень сжатия достигается за счет потери качества восстановленной речи. Методы частотной компрессии включают простейшее ограничение спектра звуковых сигналов, транслируемых в каналах связи, причем степень и форма ограничения спектра могут быть различными в зависимости от решаемой задачи. Более совершенной формой частотного компрессора является полувокодер, который позволяет обеспечить существенное сжатие полосы частот телефонного и вещательного каналов связи при сохранении требуемого качества синтеза звуков.

Дальнейшее сокращение спектра достигается путем применения вокодеров, которые обеспечивают передачу речевых сигналов в цифровой форме, что позволяет использовать дискретное засекречивание сообщений, регенерацию сигналов при переприеме и ввод их в интегральные цифровые системы связи. Однако ограничения в применении, которые пока свойственны вокодерам (невозможность включения в коммутируемую сеть), позволяют использовать их в выделенных сетях командной или служебной связи. Наконец, максимальное сжатие речевых сигналов позволит обеспечить фонемный вокодер, который может

стать удобным средством речевого ввода и вывода электронных вычислительных машин и АСУ.

Приведенная классификация методов компандирования звуков свидетельствует о том, что наблюдается параллельное развитие методов амплитудной и частотной компрессии звуковых сигналов, причем первый метод используется для оптимизации передачи естественных звуковых сигналов, а второй — для синтеза искусственной речи. На современном этапе развития оба метода имеют законченный арсенал технических решений, позволяющих оптимально решить любую конкретную задачу.

Временно́е компандирование речи также реализуется по-разному. В простейших случаях обеспечивается временно́е ограничение сигналов, допустимое в низкокачественных системах служебной связи. Временно́е сжатие и восстановление сигналов позволяет повысить качество воспроизведения звуков за счет маскировки исключенных временны́х интервалов. Временна́я компрессия речевых сигналов в сочетании с передачей дополнительных сигналов в паузах речи позволяет эффективно использовать уплотнение телефонных каналов, обеспечивать одновременную передачу аналоговых и дискретных сигналов в таких специальных сетях связи, как, например, сети связи автоматизированных систем управления.

Анализ различных методов компандирования звуков показывает, что целесообразно использование комбинационного компандирования — амплитудно-частотного, амплитудно-временно́го и амплитудно-частотно-временно́го.

Однако совместное использование рассмотренных методов для проектирования систем передачи звуковых сигналов еще не практикуется. В значительной степени это объясняется тем, что пока не решена задача включения вокодеров в коммутируемую сеть, не возникает потребность в выравнивании уровней удаленных абонентов на входе вокодера.

В то же время применение управляемого компандирования динамического диапазона может оказаться полезным в ряде областей радиотехники, в том числе и в сочетании с частотным или временны́м компандированием.

Рисунок 1.24 иллюстрирует области применения метода управляемого амплитудного компандирования, который позволяет повысить эффективность в областях магистральной радиосвязи, радиосвязи с подвижными объектами, в радиовещании, в человеко-машинных системах АСУ и в вокодерной технике. Использование управляемого компандирования на магистральной связи позволяет за счет повышения помехоустойчивости включить радиоканалы в сеть междугородных каналов связи. Это преимущество особенно ценно в системах подвижной связи, поскольку дает возможность экипажам и пассажирам транспортных средств (судов, самолетов, поездов) вести телефонные переговоры с любым абонентом ЕАСС.

В радиовещании метод управляемого компандирования имеет не меньшее значение, чем в радиосвязи, поскольку позволяет повысить эффективность использования мощных радиопередатчиков, повысить качество подачи программ вещания в наземных и космических сетях связи и, наконец, организовать систему помехоустойчивого радиовещания, причем совместимую с обычной системой.

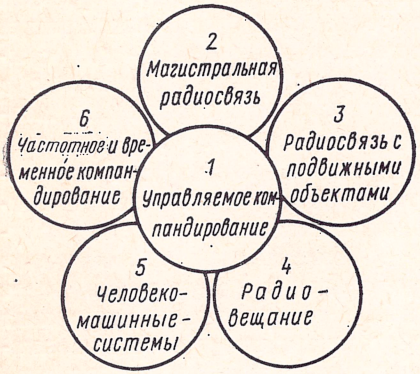


Рис. 1.24. Области применения метода управляемого компандирования

В автоматизированных человеко-машинных системах метод компандирования позволяет облегчить ввод в ЭВМ речевых сигналов от рассредоточенных абонентов с произвольным уровнем сигналов, повысить качество машинной речи, а также уменьшить объем памяти ЭВМ, необходимый для анализа-синтеза речевых сигналов.

Большое применение метод управляемого компандирования может иметь в вокодерной технике. Передача сигнала огибающей речи в полувокодерах и вокодерах наряду с другими сигнал-параметрами не только повышает возможности вокодерной техники, в смысле работы в коммутируемой сети, где абоненты имеют большой разброс рабочих уровней, но и позволяет повысить натуральность синтезированной речи за счет передачи индивидуальных и интонационных особенностей речевых сигналов. Сказанное относится и к фонемному вокодеру, поскольку максимальная степень компрессии речи достигается здесь утратой всех индивидуальных и интонационных характеристик речи.

Таким образом, классификация рассмотренных методов компандирования звуковых сигналов и областей применения управляемого амплитудного компандирования показывает, что при проектировании систем речевой связи, вещания или АСУ возникает задача выбора метода обработки звуков, оптимального для конкретной системы.

Для количественной оценки возможностей сравниваемых методов можно использовать коэффициент сравнения K, определяемый отношением суммы реализуемых каждым из i методов возможностей Σa_i к общему их числу A, указанному в технических требованиях на проектируемую систему:

$$K = \sum a_i / A.$$

Возможности, реализуемые или недостижимые, выражаются двоичной функцией («да» — «нет»). Реализуемая возможность варианта i выражается как 1 в двоичной системе счисления, а нереализуемая возможность отмечается как 0.

Числовые значения Σa_i и A определяются по таблице возможностей, пример которой представлен табл. 1.5.

ТАБЛИЦА 1.5

Метод	Возможности системы				
	передача речи	передача музыки и речи	включение в коммутируемую сеть	цифровая передача в ТЧ канал	сжатие спектра
Радиокомпандер	1	1	1	1	0
Полувокодер	1	1	1	0	1
Вокодер	1	0	0	1	1

Итак, по пяти возможностям, указанным в таблице, может быть использован в проектируемой системе радиокомпандер или полувокодер. Для окончательного решения остается сравнить стоимость соответствующих технических средств в двух вариантах.

Очевидно, что чем подробнее составлена таблица возможностей, тем вернее будет сделан выбор метода обработки звуковых сигналов в проектируемой системе. Естественно, что основным критерием выбора является назначение системы. Так, например, при необходимости передать речь в виде двоичных сигналов со скоростью 1200 бит/с нельзя предложить ничего другого, кроме вокодера. Поэтому с учетом назначения системы и анализа возможностей методов передачи звуковых сигналов можно разделить их на классы, указанные в табл. 1.6.

ТАБЛИЦА 1.6

Назначение	Метод	Технические средства	Помехоустойчивость
Магистральная радиосвязь с засекречиванием в выделенных сетях	Вокодерная телефония	Вокодер с модемом на 4800 или 2400 бит/с	Вероятность ошибки на бит $1 \cdot 10^{-3}$
Иносвязь и магистральная радиосвязь в коммутируемой сети	Управляемое компандирование	Радиокомпандер	Сигнал/шум 20—30 дБ
Подвижная и низовая радиотелефония	То же	»	Сигнал/шум 10—20 дБ
Радиовещание	Управляемый компандер, полувокодер	»	Сигнал/шум 30—40 дБ
Человеко-машинная связь в АСУ	Вокодерная телефония с управляемым компандированием	Вокодер и радиокомпандер 2400 бит/с	Вероятность ошибки на бит $1 \cdot 10^{-2}$

Классификация систем передачи звуковых сигналов по их назначению показывает, что метод управляемого компандирования

может найти применение в каждом из пяти классов (с учетом того, что возможен вариант цифрового радиокомпандера на 4800 бит/с).

Следовательно, надо подробнее рассмотреть технику управляемого амплитудного компандирования и специфику организации радиотелефонного канала связи.

2

Техника управляемого компандирования

2.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ РАДИОТЕЛЕФОНИИ

За полувековую историю развития радиотелефонной связи было предложено и реализовано множество самых различных технических систем, однако к настоящему времени четко сформировались три основные задачи:

1) амплитудное и частотное компандирование;

2) сопряжение двухпроводных и четырехпроводных линий связи и борьба с эхо-сигналами;

3) организация связи в радиопроводных сетях.

Указанные задачи взаимосвязаны, поскольку только компандирование звуковых сигналов позволяет повысить помехоустойчивость радиолиний до той степени, которая делает возможным сопряжение радиоканалов с телефонными каналами ЕАСС и, следовательно, определяет необходимость решать задачи взаимодействия цепей, автоматизации вызова в сети и т. п.

К моменту разработки метода управляемого компандирования тракт радиосвязи полностью сформировался и, фактически, был стандартизирован ввиду необходимости организации международных трансконтинентальных линий связи. Традиционный («докомпандерный») тракт радиотелефонной связи базировался на применении устройства регулирования громкости, управляемого голосом (Vogad), и устройства предупреждения самовозбуждения, управляемого голосом (Vodas) [48]. Эти устройства включают в каждый тракт на передаче и приеме, как показано на рис. 2.1.

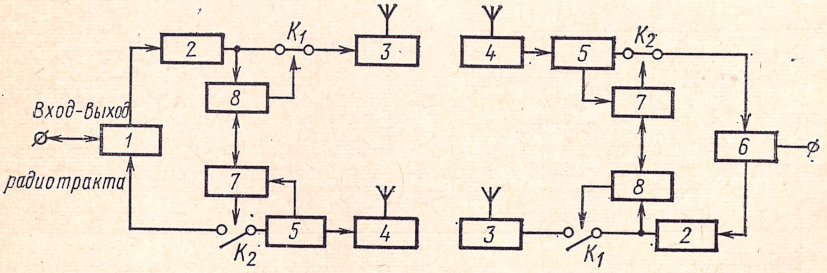


Рис. 2.1. Структурная схема докомпандерного тракта радиосвязи

Входом-выходом коммерческого радиоканала является двухпроводная абонентская линия междугородной телефонной сети, имеющая произвольную протяженность и существенный разброс входных уровней и линейных параметров. Элементом сопряжения двухпроводной телефонной линии и четырехпроводного радиоканала, состоящего, по существу, из двух автономных симплексных радиолиний, является дифференциальная система, выполняемая в виде трансформаторной, диодной, активной или иной балансируемой схемы. Дифференциальная система *1* подключена в радиотракте к входу регулируемого усилителя *2* (Vogad), назначением которого является устранение разницы в уровнях входящих различных подключаемых абонентов и ограничение динамики речи, с тем чтобы загрузить радиопередатчик *3* по возможности постоянным уровнем. Принимаемый радиосигнал демодулируется радиоприемником *4* и поступает на приемный полукомплект регулятора фединга *5*, который должен компенсировать разницу в уровнях, обусловленную замираниями речевых сигналов, которые цепь АРУ приемника не смогла ликвидировать по причине своей инерционности.

По существу, устройство Vogad является усилителем-ограничителем, работающим в тракте с переменным затуханием. Поэтому в передающем тракте возможны нелинейные искажения сигнала, а на приеме, кроме того, могут усиливаться деформации уровня, вызванные замиранием. Поскольку усиление в цепи Vogad непрерывно изменяется в такт с изменением уровня речевого сигнала и замираний, возможно неконтролируемое усиление эхо-сигналов, поступающих из тракта приема в тракт передачи через дифференциальные системы дальнего конца *6* и ближнего конца *1*. В результате в четырехпроводной радиолинии возникает «возбуждение», и телефонная связь оказывается невозможной. Поэтому в тракт параллельно дифсистемам дальнего *6* и ближнего *1* концов вводятся устройства Vodas — эхо-заградители, управляемые голосом. Эхо-заградители содержат анализирующие и коммутационные элементы (*7, 8* и K, K_2), управляемые уровнем, работающие по алгоритму отключения сигнала минимального уровня.

Недостатки подобной системы очевидны. Так, скорость и диапазон управления речью на передаче и приеме нельзя увеличить существенно, так как соответственно усиливаются помехи, неотличимые от речевого сигнала. Эхо-заградитель Vodas при поступлении входящего сигнала с телефонной линии разрывает цепь радиоприема, а на стороне приема одновременно разрывает цепь передачи, что исключает самовозбуждение линии. Однако, поскольку эхо-заградитель не может отличить сигнала от шума, приходится увеличивать порог срабатывания анализаторов *7* и *8*, в результате чего становится невозможным перебой собеседника в разговоре, и эхо-заградитель «срезает» первую часть каждого слова или слога, причем возможно отключение обоих трактов, если оба абонента начинают говорить одновременно. Поэтому ра-

диотелефонный канал постоянно контролируется радиооператором, который вручную регулирует уровень усилителей *2* и *5*, а также изменяет порог анализаторов *7* и *8*. Несмотря на эти меры, качество радиотелефонной связи с устройствами Vogad—Vodas оставалось низким, а возможность сопряжения радиоканалов с телефонными каналами в единой сети исключалась. Ручное регулирование режима работы оконечного оборудования радиоканала обусловило и ручную организацию связи в радиоканале, что исключало включение радиолиний в автоматизированную коммутируемую телефонную сеть.

Использование такого эффективного метода повышения помехоустойчивости радиосвязи, как управляемое компандирование, позволяет поставить и решить задачи сопряжения радиоканалов с телефонной сетью, решить задачи автоматизации организации радиосвязи.

Иногда задача совершенствования радиолиний коротковолнового диапазона не считается актуальной в связи с развитием наземных и космических многоканальных средств связи. Однако в ряде случаев мобильность и экономичность радиоканала остаются вне конкуренции. Достаточно напомнить о том, что флоты развитых стран насчитывают сотни тысяч судов, что при стихийных бедствиях мобильность коротковолновых линий не раз доказывала их важность. Кроме того, по материалам данной главы нетрудно оценить, сколь велики усилия промышленно-развитых стран в совершенствовании техники коротковолновой радиосвязи. Наконец, следует подчеркнуть, что развитие техники управляемого компандирования речи актуально и важно не только для отрасли радиосвязи, но и для ряда других смежных отраслей (см. рис. 1.24).

Применение управляемых компандеров обеспечивает:

1) максимальный коэффициент модуляции радиопередатчика за счет постоянства уровня модулирующего сигнала (передатчик постоянно излучает максимальную мощность);

2) подавление шумов в паузах речи (более 50% времени) за счет запирания экспандера в паузах;

3) постоянство затухания в канале связи на стыке с двухпроводной линией (например, можно нормировать затухание);

4) ослабление прослушивания станционных помех и замираний — устраняется «акцент» радиоканала;

5) повышение помехоустойчивости работы эхо-заградителя — в некоторых случаях возможно обеспечивать одновременный разговор абонентов без эхо-заградителя.

Указанные преимущества метода компандирования обусловили быстрое развитие соответствующей техники, и в ряде стран (Франции, Англии, США, ФРГ, Японии и СССР) были разработаны управляемые компандеры для радиосвязи — радиокомпандеры.

2.2. ЗАРУБЕЖНЫЕ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ КОМПАНДИРОВАНИЕМ

Первая публикация о разработке системы радиотелефонной связи с управляемым компандированием появилась во Франции в 1961 г.[8, 49]. Радиокомпандер содержал все основные узлы современного радиотелефонного тракта (управляемые компрессор и экспандер, элементы организации связи, вызывные приборы, дифференциальную систему) кроме эхо-заградителя, причем предполагалось, что последний не понадобится в тракте с управляемым компандированием.

Аппаратура была разработана для использования в коротковолновых и тропосферных каналах связи и испытывалась на трассах «Париж — Бамако» и «Париж — Дакар».

Структурная схема аппаратуры с органами управления изображения на рис. 2.2. Радиокомпандер имеет два входа — сигнальный *1* для подачи телефонных сообщений с междугородной телефонной станции (МТС) и выдачи телефонных сигналов и служебный *2* для организации связи радиооператором.

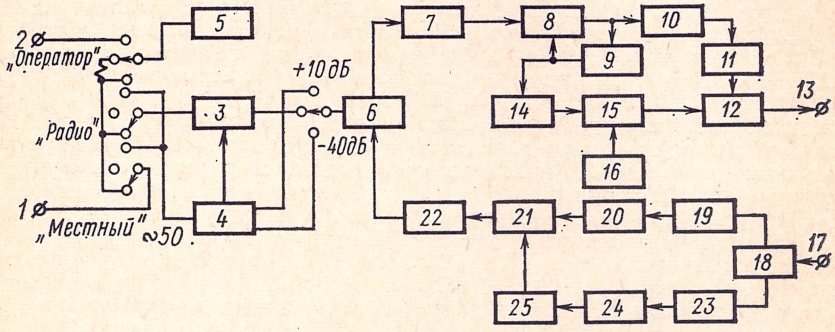


Рис. 2.2. Структурная схема радиокомпандера с пультом оператора

Сигнальный вход *1* через ключи *Местный* и *Радио* подключается к вызывному блоку *3*, к которому подключен также генератор вызова *4*, формирующий вызывной радиосигнал на частоте 1000 Гц с амплитудной манипуляцией в 20 Гц (1000/20) с двумя уровнями +10 дБ и —40 дБ и вызывной сигнал 50 Гц в сторону МТС.

Вызывной блок *3* содержит передатчик вызова и приемники вызова, ориентированные в сторону радиоканала и в сторону МТС. Организация связи выполняется оператором радиобюро вручную со специального пульта *5*, посредством манипуляции ключами *Оператор, Радио, Местный, Включение в цепь, Регулировка* и другими органами управления. При организации связи устанавливается связь с местными радиоприемными и радиопередающими центрами, с оператором местной МТС и радиооператором корреспондента. Только после организации связи и вызова абонента на дальнем конце оператор ближнего конца может передать канал в эксплуатацию.

Телефонный сигнал через дифференциальную систему *6*, осуществляющую согласование двухпроводного телефонного канала с четырехпроводным каналом радиокомпандера, поступает в тракт передачи. Входным элементом *7* тракта передачи является фильтр 0,3—3 кГц, с выхода которого речевой сигнал поступает на компрессор *8*, выполненный на элементах с регулируемым усилением (германиевые диоды, позволяющие получить управляющее напряжение в вольтах, пропорциональное вводимому затуханию в децибелах). Компрессор *8* преобразует входной сигнал с переменным уровнем на линии в диапазоне от +10 дБ до —40 дБ в сигнал, пиковый уровень которого при длительности

приблизительно 30 мс является постоянным с разбросом от 3 до 4 дБ. Компрессор *8* управляется по выходу, т. е. через детектор огибающей *9*, сигнал с выхода которого подается в цепь управления компрессора *8*. Компрессированный речевой сигнал поступает через полосовой фильтр *10* (0,3 — 3,0 кГц) на устройство засекречивания *11*, откуда через линейный усилитель *12* транслируется по соединительной линии *13* к радиопередатчику.

Управляющий компрессором сигнал одновременно подается в подканал управления, в котором последовательно включены реактивный элемент *14* и управляемый по частоте генератор *15*, выход которого подключен ко второму входу выходного усилителя *12*.

Генератор *15* обеспечивает изменение частоты от 4050 Гц (без сигнала или при уровне сигнала — 40 дБ) до 4150 Гц для уровня +10 дБ, т. е. 2 Гц на 1 дБ изменения уровня. Частота генератора является линейной функцией управляющего напряжения компрессора *8*.

Ввиду необходимости поддержания высокой точности модуляционной характеристики «напряжение — частота» генератор *15* калибруется с помощью специально подключаемого частотного компаратора *16*, выполненного на двух кварцах (4,05 и 4,15 кГц). Калибровка частоты выполняется оператором вручную по индикатору с точностью до 1 Гц. Приемный полукомплект радиокомпандера подключается к соединительной линии *17*, транслирующей сигналы с выхода радиоприемника на вход линейного усилителя *18*. В речевом подканале радиокомпандера последовательно включены рассекречивающее устройство *19*, фильтр *20* с полосой 0,3—3,0 кГц и управляемый экспандер *21*, выполненный на элементах с регулируемым усилением, как и в компрессоре *8*. На выходе экспандера *21* включен фильтр *22* (0,3—3,0 кГц). В управляющем подканале включены последовательно фильтр селекции сигнала *23* с полосой 4,05—4,15 кГц, амплитудный ограничитель *24* с регулированием сверх 40 дБ и частотный дискриминатор *25*, выход которого подключен к управляющему входу экспандера *21*. Восстановленный телефонный сигнал с выхода экспандера через фильтр *22* (0,3—3,0 кГц), дифференциальную систему *6* и пульт оператора поступает на абонентскую линию МТС (линия *1*).

При испытаниях системы было отмечено, что допустимое отношение сигнал/шум в полосе 0,3—3,0 кГц составило 20 дБ. В этом случае потеря разборчивости становилась заметной. Неприемлемая потеря разборчивости наступила при отношении сигнал/шум около 10 дБ. Эти данные получены при условии, что отношение мощностей звукового и управляющего канала составляет 6 дБ. При введении тональной помехи вместо шумовой результаты получаются лучше. Испытания показали, что линейность в общем тракте поддерживалась (в статике) равной ±3 дБ в диапазоне +20÷—40 дБ.

Отмечено, что после прогрева и регулировки в обоих направлениях тракта аппаратура обеспечивала постоянство затухания в пределах 6 дБ и исключила возникновение эхо-эффекта в течение 15 дней без подстройки.

При разработке аппаратуры было обращено внимание на выбор временны́х параметров системы в соответствии со скоростью восприятия звуков человеческим ухом, причем рекомендовано передавать звуки длительностью 20—30 мс с временны́ми искажениями длительности звуков не более 10 мс. Временны́е запаздывания звуковых и управляющих сигналов были выравнены до значения 4 мс.

К достоинствам системы относится то, что качество передачи перестало зависеть от входного уровня телефонного сигнала, поступающего от абонента, а паузы очистились от шума, что привело к облегчению обслуживания радиолиний и позволило обеспечить сопряжение радиоканалов с каналами дальней связи.

К недостаткам следует отнести то, что система несовместима с классическими каналами ТЧ, так как управляющий канал расположен за полосой стандартного канала (4,05—4,15 кГц).

Кроме того, помехоустойчивость метода управляемого компандирования реализована не полностью, поскольку на вход управляемого экспандера подан замирающий сигнал и, несмотря на управление, сохраняется возможность «усиления быстрых замираний» экспандером внутри интервала управления (внутри слога). К тому же в первой публикации по радиокомпандеру не осве-

щены специальные вопросы построения звукового подканала, а построение управляющего подканала выполнено не лучшим образом, т. е. сохраняется необходимость в ручной калибровке частотномодулированного генератора.

Все указанные недостатки первого радиокомпандера устранены в последующих моделях, разработанных в разных странах. Основной недостаток первого радиокомпандера — экспандирование замирающего сигнала — был устранен в экспериментальной системе, испытанной в 1964—1965 г. научно-исследовательским отделом Британского почтового ведомства [50]. В этой системе перед экспандером был включен «усилитель постоянной громкости», чтобы избавиться от быстрых замираний неустраняемых инерционной схемой авторегулировки усиления в приемнике. Включение регулятора замираний позволило осуществить компандирование в условиях, эквивалентных постоянному затуханию в канале связи.

Экспериментальный макет позволял передавать речевой и управляющий сигналы в преобразованной полосе частот, смещенной на 550 Гц. При этом управляющему каналу выделялась низкочастотная часть телефонного канала 250—640 Гц, а речевой подканал ограничивался соответственно так, что составляющие выше 2450 Гц не передавались. Естественно, что такое ограничение спектра речи снижало качество звучания, а преобразование сигналов на входе и выходе радиоканала усложняло оборудование. Однако испытания системы на радиолиниях, связывающих Англию с Индией и США, показали такие существенные преимущества системы с управляемым компандированием перед «нормальной» системой «Vogad — Vodas», что в разных странах начались интенсивные поиски оптимальных технических решений для реализации метода управляемого компандирования. После добавления в тракт приема регулятора замираний новая система приобрела законченность и получила название «Линкомпекс» [50, 51]. (Слово «Линкомпекс» не является собственным именем, не относится к фирменному обозначению продукции, а служит полезным апронимом для выражения английского словосочетания «соединенные компрессор и экспандер», точно раскрывающего принцип управляемого компандирования. Заметим, что по поводу такого названия в МККР имелись возражения ряда стран ввиду неблагозвучности слова на некоторых языках. Дебаты вывел из тупика делегат СССР Е. Е. Добровольский, напомнив о том, что русское слово «спутник» вошло в языки всех народов и разработчик вправе дать имя методу. Это заявление делегата СССР было одобрено единогласно.)

Поскольку дальняя радиосвязь, как правило, является международной, объединяющей разные страны и континенты, потребовалась стандартизация параметров системы «Линкомпекс», обеспечивающая совместимость национальных радиосредств.

В 1966 г. III Исследовательская Комиссия МККР (системы фиксированной службы) на XI Пленарной Ассамблее в г. Осло единогласно приняла отчет № 354 «Усовершенствованная система передачи для высокочастотных радиотелефонных линий», в котором содержались сведения о преимуществах, особенностях и параметрах системы «Линкомпекс» [9]. В отчете отмечалось, что оконечная аппаратура, используемая в радиотелефонии, состоит из усилителей-ограничителей (Vogad) и заградителей обратной связи (Vodas). Усилитель-ограничитель обеспечивает сохранение среднего значения звукового уровня на входе радиопередатчика независимо от уровня речи говорящего (без усилителя-ограничителя, из-за высокого пик-фактора речи, мощность передатчика в течение большого процента времени была бы значительно меньше номинальной). Приемные усилители-ограничители уменьшают колебания уровня речи при наличии замираний, но не отличают их от атмосферных и станционных помех и фактически подчеркивают помехи, если их уровень достигает порога ограничения.

При высоких уровнях помех нормальное действие эхо-заградителей нарушается, в результате чего возникает подавление сигналов речи. Исключить указанные недостатки позволяет система «Линкомпекс», в которой речь компандируется. На передаче частотная составляющая речи сжимается до постоянной амплитуды и управляющий сигнал компрессора используется для частотной модуляции генератора в отдельном канале передачи амплитудной со-

ставляющей речи, причем частотный и амплитудный сигналы передаются в стандартной полосе 250—3000 Гц.

Принимаемые речевые и управляющие сигналы вновь усиливаются до постоянного уровня, причем сигнал огибающей речи используется для регулировки усиления экспандера, обеспечивая восстановление исходных амплитудных изменений речевых сигналов так, как это происходит в каналах с постоянным затуханием.

Структурная схема системы «Линкомпекс» показана на рис. 2.3. Радиоканал начинается, как обычно, с дифференциальной системы, *1,* сопрягающей двухпроводное окончание с четырехпроводным. Эхо-заградитель *2* включается

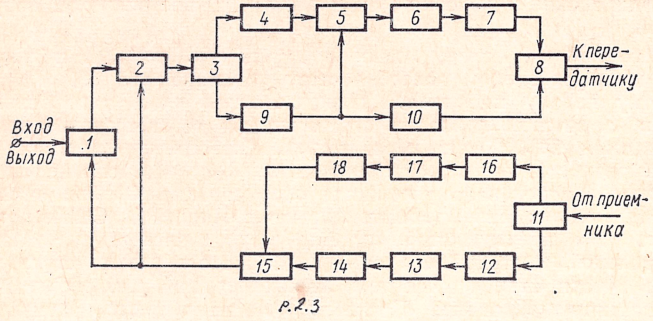


Рис. 2.3. Структурная схема системы «Линкомпекс»

в тракт передачи и управляется сигналами приемника. Тракт передачи содержит разделитель *3,* с первого выхода которого частотная составляющая речи после задержки *4* поступает на компрессор *5,* вновь задерживается (блок *6*), фильтруется в полосе 250—2700 Гц (фильтр *7*) и поступает на вход сумматора *8*.

Со второго выхода разделителя *3* сигнал поступает на детектор огибающей *9,* который одновременно управляет усилением компрессора *5* и изменением частоты генератора *10,* выход которого подключен ко второму входу сумматора *8*, транслирующего суммарный сигнал в полосе 250—3000 Гц к радиопередатчику. Сигнал с выхода радиоприемника через разделитель *11* попадает в речевой и управляющий подканалы. В речевом подканале последовательно включены фильтры *12* (250—2700 Гц), регулятор замираний *13,* блок задержки *14* и управляемый экспандер *15*. В управляющем подканале последовательно включены полосовой фильтр *16* (2800—3000 Гц), ограничитель *17* и частотный дискриминатор *18,* выходной сигнал которого, являясь огибающей речи, управляет усилением экспандера. Радиокомпандер обеспечивает сжатие передаваемых сигналов до постоянного уровня при изменении уровней на входе в пределах 60 дБ. Предкомпрессорная задержка сигнала исключает амплитудные выбросы, возникающие из-за запаздывания регулирующих сигналов с детектора огибающей. Блоки задержки *6* и *14* синхронизируют сигналы на входах управляемого экспандера. Эти блоки могут выключаться при включении вместо них устройств обеспечения негласности связи, которые вносят временно́й сдвиг сигналов.

Управляющий сигнал определяет усиление компрессора *5* и модулирует генератор *10,* изменяя его частоту на 2 Гц при изменении входного уровня компрессора на 1 дБ. Частота изменяется «вниз» от 2960 Гц при отсутствии входного сигнала до 2840 Гц при максимальном сигнале. Частотная модуляция «вниз» уменьшает влияние перекрестных искажений, так как при малых уровнях, действующих в большинстве случаев, управляющий сигнал сдвинут возможно дальше. При больших уровнях речи перекрестные искажения менее заметны. Предусмотрено изменение частоты ЧМ генератора в пределах 2810—2990 Гц.

С целью поддержания постоянства затухания на выходе системы необходимо, чтобы регулируемое затухание экспандера *15* превышало сумму усилений компрессора и регулятора замираний, выполненного в виде компрессора.

В соответствии с существующими в практике радиотелефонии условиями максимальный диапазон управления принят равным 60 дБ, и поскольку усиление регулятора замираний составляет 15—20 дБ, усиление компрессора не должно превышать 45 дБ. Для входных уровней, лежащих ниже диапазона компрессии, компрессор должен работать линейным усилителем, причем дальнейшее уменьшение уровня компенсируется усилением регулятора замираний. Следовательно, максимальное улучшение отношения сигнал/помеха не обеспечивается для уровней, попадающих на линейную часть характеристики компрессора, которая должна быть ограничена — 44 дБ. Основные параметры модема «Линкомпекс» (табл. 2.1) были положены в основу последующей Рекомендации МККР № 455.

ТАБЛИЦА 2.1

Функциональный блок	Основные параметры	Значения
Компрессор	Диапазон уровней, при которых выход постоянный	—4 —44 дБ
	Постоянная времени	18—20 м/с
Предкомпрессорная задержка	Время задержки	3,5—4,5 мс
Фильтр речи	Полоса частот	250—2700 Гц
Регулятор замираний	Диапазон уровней	—3/—27 дБ
	Постоянная времени	18—20 мс
Экспандер	Диапазон уровней	60 дБ
	Постоянная времени	8—10 мс
	Сжатие	2 : 1
Детектор огибающей (компрессор)	Диапазон уровней	—4/—64 дБ
	Постоянная времени	18—20 мс
ЧМ генератор	Средняя частота	2900 Гц
	Частотное отклонение	+60 Гц
	Изменение частоты	2 Гц на 1 дБ
	Уровень средней частоты	—34 дБ
	Постоянная времени	4 мс
	Полоса	1800—3000 Гц
Ограничитель	Диапазон уровней	—8/—45 дБ
Дискриминатор	Изменение уровня	1дБ на 2 Гц
Блоки задержки	Время задержки	20±4 мс

Система «Линкомпекс» введена в эксплуатацию на некоторых дальних радиолиниях (между Лондоном и Найроби, Иоганнесбургом, Коломбо, Лагосом, Тель-Авивом).

При испытаниях не было определено увеличение длительности коммерческого использования радиоканала, однако отмечалось существенное улучшение качества связи. Так, увеличение оплачиваемого времени за сообщение составило 6% (от 88 до 94%), а увеличение процента связей, которые считаются «легкими», — 25% (от 60 до 85%). При этом отмечено удвоение числа переданных сообщений по сравнению с обычными каналами [9].

В ФРГ [52] опубликовано сопоставление результатов испытаний каналов «Линкомпекс» на линии «Франкфурт-на-Майне — Нью-Йорк» с результатами, вытекающими из более ранних наблюдений, проводимых на линиях спутниковой связи и трансатлантических кабельных линий (ТАТ). Получены следующие результаты по количеству телефонных разговоров с хорошей разборчивостью, без переспросов абонентов:

95,1% — при ТАТ кабеле,

94,5% — для спутниковых линий,

87,8% — для линий системы «Линкомпекс».

Из приведенных данных видно, что доля разговора с хорошей разборчивостью для всех видов передачи является сравнительно высокой, хотя можно отметить, что система «Линкомпекс» испытывалась в худших условиях. Некоторые сравнительные особенности результатов приведены в табл. 2.2.

ТАБЛИЦА 2.2

Параметр	Значение параметра для системы	
	«Линкомпекс»	Стандартный ТЧ канал
Предельно допустимое коммерческое качество разговоров достигается при отношении сигнал/помеха в телефонном канале примерно	5 дБ	20—25 дБ
Модуляция передатчика речью в канале относительно пиковой мощности передатчика:		
а) одноканальный режим	— 4 дБ	0 дБ
б) многоканальный режим	—16 дБ	—6 дБ
Ограничение шума и помех	Практически полное подавление шума во время речевых пауз Уменьшение шума во время разговора; телеграфная помеха существенна лишь при проникновении в контрольный канал (примерно на одинаковом уровне)	Во время разговора неэффективно, во время пауз частично эффективно; зависит от отношения сигнал/помеха; никакого ослабления шума или телеграфных помех
Диапазон колебаний громкости при приеме на различных линиях связи	Примерно 50—90 фон (как при кабельных связях)	80—90 фон
Ослабление селективного замирания	Заметно	Почти нет

Структурная схема «нормального» радиотракта с добавлением радиокомпандера «Линкомпекс» показана на рис. 2.4. В него входит комплекс самостоятельных функциональных устройств:

1 — переходное устройство для работы по двухпроводным и четырехпроводным цепям (радиопроводное переходное устройство РППУ); *2* — эхо-заградитель, препятствующий возникновению самовозбуждения в радиолинии; *3* — вызывное устройство, с помощью которого производится организация радиотелефонной связи; *4* — приемо-передающий полукомплект аппаратуры «Линкомпекс»; *5* — аппаратура маскировки речи, обеспечивающая негласность радиотелефонной корреспонденции; *6* — устройство смещения полосы, обеспечивающее включение двух телефонных каналов в полосе 250—6000 Гц однополосной радиолинии, так что несмещенный канал работает в полосе 250—3000 Гц, а смещенный — в полосе 3260—6000 Гц.

Все указанные устройства конструктивно выполняются в виде стойки, оформленной как пульт телефонистки.

В последующем появилась модификация системы «Линкомпекс» [12], которая является трехканальной системой, защищенной от ухода частоты. Любое изменение частоты в управляющем канале, вызванное различными неста-

бильностями в каналах связи (например, при использовании радиопередатчиков без высокостабильных синтезаторов частоты), искажает речевой сигнал. Задача решена введением дополнительного контрольного канала. Система, за-

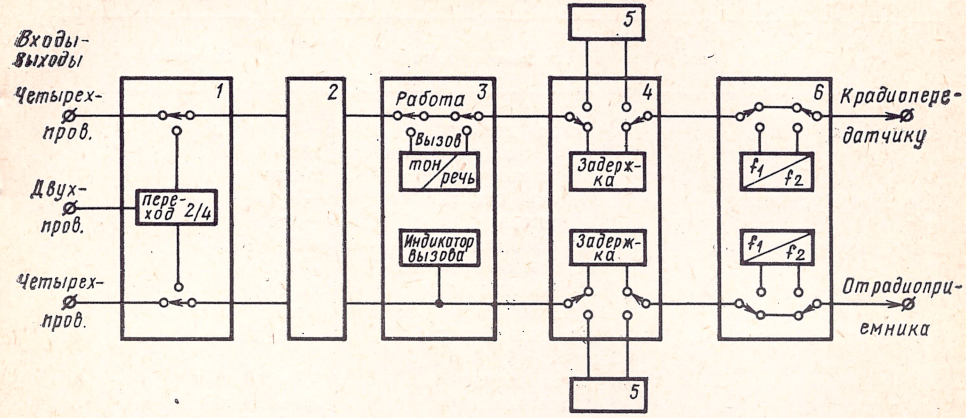


Рис. 2.4. Функциональная схема радиотелефонного канала связи

щищенная от ухода частоты, предусматривает передачу, кроме управляющего сигнала, еще эталонного контрольного сигнала. Дискриминатор регистрирует разницу между частотой контрольного и управляющего сигналов. Уход частоты в передатчике, приемнике или канале связи в равной мере влияет на частоты контрольного и управляющего сигналов, что позволяет сохранить разность этих частот постоянной, ограничивая тем самым эффект ухода частоты. Для системы с шириной полосы 3 кГц частота эталонного контрольного сигнала составит 2650 Гц. Диапазон частот управляющего сигнала 2840—2960 Гц. При этом происходит уменьшение верхней частоты речи от 2700 до 2500 Гц, т. е. для передачи речи остается полоса 250—2500 Гц.

Сложность реализации системы «Линкомпекс» определяется ее особенностями, ибо аналоговые методы управления компрессорами и экспандерами, разнесенными на тысячи километров, требуют высокой точности управления и высокой стабильности параметров всех элементов системы. Кроме того, сами управляющие и управляемые элементы должны обладать весьма высокими и стабильными параметрами (по амплитудным, частотным и временным характеристикам), а также иметь чувствительные и надежные органы контроля этих параметров.

В 1968 г. были опубликованы [53] результаты испытаний макета радиокомпандера, разработанного японской фирмой «Кокусай Дэнсин Дэнва» (Международная телеграфно-телефонная компания — КДД). Структурная схема аппаратуры соответствовала системе «Линкомпекс» и отличалась, в основном, техническими параметрами функциональных блоков, которые указаны в табл. 2.3. При выборе рабочих параметров макета учитывались как физиологические особенности речи (принималось, например, что за 1 с произносится до 10 слогов), так и особенности технического проектирования коротковолновых модемов. Для уменьшения, например, влияния нестабильности частоты в радиолинии увеличена девиация частоты (3 Гц на 1 дБ). Следовательно, для передачи динамического диапазона речи в 60 дБ необходима девиация частоты 180 Гц. Кроме того, ширина полосы f канала управления определяется постоянной времени компрессора $T_g = RC = 20$ мс: $f = \frac{1}{2\pi RC} = 8$ Гц. Поскольку индекс частотной модуляции в управляющем канале составляет величину около 10 и недостаточен для обеспечения необходимой помехоустойчивости, мощность ЧМ

сигнала доведена до мощности компрессированного речевого сигнала, причем уровень передачи двух сигналов вместе составляет 3 дБ.

ТАБЛИЦА 2.3

Функциональный блок	Основные параметры	Значения
Компрессор	Рабочий диапазон	—50/+5 дБ
	Коэффициент сжатия	1/10
	Постоянная времени	20 мс
Линейный усилитель	Звуковой сигнал	—3 дБ
	ЧМ сигнал	—3 дБ
Регулятор замираний	Рабочий диапазон	—20/+5 дБ
	Постоянная времени	50 мс
Экспандер	Рабочий диапазон	60 дБ
	Постоянная времени	4 мс
Частотный модулятор	Девиация частоты (вверх)	3 Гц/дБ
	Полоса частот	2,7—2,9 кГц
Фильтры речи	Полоса частот	0,3—2,5 кГц
Ограничитель	Рабочий диапазон	—20/+5 дБ
Задержка речи	На передаче	6 мс
	На приеме	8 мс
ЧМ дискриминатор	Центральная частота	2750 Гц

По сравнению с модемом «Линкомпекс» японский радиокомпандер имеет определенные недостатки. Так, сокращение полосы звукового канала до 2500 Гц несколько ухудшило качество звучания. Несколько увеличились переходные помехи ввиду увеличения девиации частоты и выбора направления модуляции вверх, т. е. бо́льшую часть времени работы управляющий сигнал находится вблизи звукового канала и отделяется от него только при резком повышении громкости.

Выбор большой постоянной времени регулятора замираний исключает поддержание устойчивого уровня замирающего сигнала постоянным внутри слогов, что не позволяет получить максимальный выигрыш по помехоустойчивости.

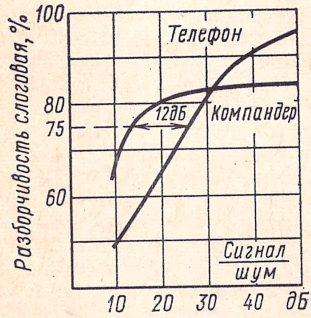


Рис. 2.5. График оценки помехоустойчивости управляемого компандера

Однако результаты испытаний, полученные с данным макетом, показали преимущества метода управляемого компандирования.

При лабораторных испытаниях выполнялись артикуляционные измерения на шумовой помехе. На рис. 2.5 приведены соответствующие графики для радиокомпандера и обычного телефона стандартной абонентской линии. Анализ графиков показывает, что при отношении сигнал/шум 50 дБ радиокомпандер имеет худшую разборчивость, чем телефон. Это ухудшение вызвано специфическими свойствами компандерного тракта: перекрестными искажениями подканалов, ограничением полосы частот и др. Однако на уровне разборчивости в 75%, т. е. в условиях, когда фразовая разборчивость достигает 95%, выигрыш радиокомпандера составляет 12 дБ. Линейные испытания с субъективно-статистической оценкой качества радиосвязи телефонными абонентами были выполнены на трассе «Токио — Осака» (600 км) в феврале-августе 1967 г., причем слушатели интервьюировались о числе переспросов, частота которых уменьшилась в 4 раза при использовании радиокомпандера.

Некоторые данные опроса слушателей, оценивавших качество связи по пятибалльной системе, представлены в табл. 2.4.

ТАБЛИЦА 2.4

Условная оценка разборчивости (субъективная)	Оценка качества речи	Процент слушателей	
		«Линкомпекс»	Стандартный ТЧ канал
4	Отлично	58,6	31,0
3	Хорошо	34,4	37,9
2	Посредственно	5,2	13,8
1	Плохо	1,8	13,8
0	Очень плохо	0	3,5

Из этой таблицы следует, что при пятибалльной шкале оценки качества речи по артикуляции средние оценки для радиокомпандера и обычной системы мало различаются (3,5 против 2,8). В то же время при использовании системы с управлением число «отличных» сеансов связи существенно увеличивалось и совершенно исключились «очень плохие» сеансы.

Опрос абонентов показал, что 77,6% предпочитают канал с радиокомпандером, мотивируя свой выбор отсутствием пропадания слов и замираний. Оценка слоговой разборчивости на радиолинии показала, что снижение разборчивости по сравнению с лабораторными испытаниями незначительно (3—5%).

Важно отметить, что если при практическом отсутствии замираний частот 19,5% слушателей предпочли стандартную радиосистему (Vogad), то при наличии сильных замираний за радиокомпандер высказались все 100% опрошенных.

Во время цикла испытаний по определению натуральности речи абоненты ответили на вопросы анкеты, показанные в табл. 2.5.

ТАБЛИЦА 2.5

Содержание анкеты		Процент ответов
Условия связи	Очень хорошие	60,0
	Хорошие	34,0
	Удовлетворительные	6,0
	Плохие	0
	Очень плохие	0
Сравнение с обычным телефоном	Одинаково	47,0
	Немного хуже	51,8
	Очень плохо	0
Натуральность речи	Естественная	48,2
	Небольшая потеря натуральности	50,6
	Неестественная	0
Возможность применения на международной линии	Нет возражений	89,4
	Нежелательно	4,7

Итак, испытания показали, что 50% слушателей не замечают потерь натуральности речи по сравнению с обычным телефоном. В то же время 100% абонентов оценили качество речи радиокомпандера как приемлемое.

В 1969 г. фирмой «Оки Электрик» была разработана [54] эксплуатационная модель радиокомпандера, испытанная на линии «Токио — Огасавара». Параметры этой системы обеспечивают совместимость с системой «Линкомпекс»,

т. е. полоса речевого канала 300—2700 Гц, а средняя частота управляющего сигнала 2900 Гц при девиации ±90 Гц.

Амплитуда речевого сигнала, получаемая посредством раздельной передачи частотных и амплитудных составляющих речи, пропорциональна амплитуде передаваемой речи, т. е. потери (остаточное затухание) в тракте от входа передатчика до выхода приемника поддерживаются постоянными, что обеспечивает возможность нормирования затухания как в проводных линиях связи (поэтому система названа «система с постоянным остаточным затуханием»).

Во время опытной эксплуатации радиолинии были сформулированы требования к каналу связи, которые необходимо соблюдать для эффективного применения радиокомпандера.

Установлено, что поскольку шумы в тракте распространения влияют главным образом на канал управления, в результате чего речь искажается, следует обеспечивать отношение сигнал/шум более 15 дБ.

Помехи, проникающие в полосу речевого канала, подавляются компандерами и не влияют заметным образом на качество речи, однако, попадая в канал управления, они искажают речь и одновременно увеличивают громкость, что может привести к опасности возбуждения линии (при отсутствии эхо-заградителя). Поэтому желательно, чтобы отношение сигнал/помеха было больше 20 дБ.

Для уменьшения влияния неравномерности амплитудно-частотной характеристики тракта рекомендуется регулировать уровень сигнала с выхода передатчика радиокомпандера так, чтобы его величина на частоте 2,9 кГц по отношению к уровню на частоте 1 кГц была на 5—6 дБ меньше. Кроме того, может понадобиться корректировка соединительных линий.

Радиокомпандер позволяет подавлять переходные разговоры, возникающие в радиотракте до 60 дБ, но если переходные разговоры появляются на входе компрессора, то их влияние может стать существенным, особенно при попадании в виде помех в тракт управления. Поэтому в соединительных линиях желательно обеспечивать отношение сигнал/помеха более 45 дБ.

Нестабильность частоты в тракте радиосвязи, где применяется радиокомпандер, должна быть ограничена величиной ±3 Гц, так как в противном случае изменяется остаточное затухание, регулируемое управляющим сигналом, и возникает опасность самовозбуждения линии в случае отсутствия эхо-заградителя. В результате анализа временных задержек в аппаратуре и канале связи, а также влияния нестабильностей и помех на изменения уровня управления сделан вывод о целесообразности применения в тракте эхо-заградителя. За пять месяцев эксплуатации радиокомпандера было установлено, что в дни с хорошим прохождением радиоволн была возможна круглосуточная связь; в дни с плохим распространением связь была возможна в 85% времени, что было недостижимо для докомпандерных систем.

По результатам испытаний сделан вывод о том, что качественная связь возможна в условиях, когда замирания не превышают глубины 25 дБ и при отношении сигнал/шум 10—15 дБ, причем шумы в паузах подавляются на 50 дБ.

Управляемый компандер CNL («Constant net loss» — постоянное остаточное затухание), разработанный фирмой «Bell» (США), обеспечивает загрузку четырехканального однополосного радиопередатчика [55] с размещением каналов в полосе 12 кГц, причем уровни канальных сигналов выбираются так, чтобы исключить перегрузку передатчика (рис. 2.6).

Каждый из четырех автономных каналов ТЧ содержит все приборы, необходимые для организации радиосвязи [26]. Пульт оператора *1* содержит приборы управления и сигнализации, к которым подключены передатчик *2* и приемник *3* вызова, работающие в сторону радиоканала током (1000 Гц), модулированный по амплитуде (20 Гц). Вызывные сигналы вводятся в обход компрессора и выводятся с выхода регулятора замираний. Это является недостатком системы (как впрочем и других зарубежных модемов), поскольку не использованы возможности повышения помехоустойчивости вызова. Двухпроводный телефонный тракт соединяется с четырехпроводным компандерным трактом дифференциальной системой *4*, входы и выходы которой подключены к эхо-заградителю 5. Радиокомпандер содержит двухкаскадный компрессор *6*.

Первый каскад компрессора содержит детектор огибающей, сигнал с которого управляет также вторым каскадом компрессора и подается в управляющий подканал, содержащий последовательно включенные логарифматор *7*, частотный модулятор *8* и полосовой фильтр *9* (2820—3000 Гц). Компрессированный речевой сигнал задерживается в блоке задержки *10* и засекречивается в устройстве негласности *11*, которое представляет собой пятиполосный коммута-

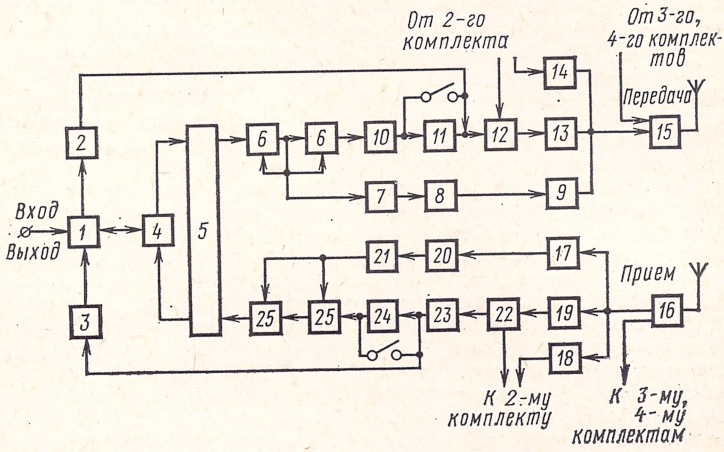


Рис. 2.6. Структурная схема четырехканального радиотелефонного тракта

тор сигналов с ручной сменой шифра частотных перестановок (интервал перестановки 550 Гц). Сформированный речевой (или вызывной) сигнал поступает на вход блока сдвига *12* (шифтер), с помощью которого спектр речевого сигнала переносится в отведенную полосу частот радиопередатчика. На выходе шифтера *12* включен режекторный фильтр *13* (2820—3230 Гц), защищающий полосу, отведенную для передачи управляющих сигналов. Ко второму входу блока сдвига *12* подключен выход управляемого компрессора второго канала ТЧ, а управляющий — общий тракт через фильтр *14* (3050—3230 Гц). Выходы фильтров объединяются, и групповой сигнал транслируется к радиопередатчику *15*. Ко второму модулирующему входу радиопередатчика *15* (с двумя независимыми полосами) подводится групповой сигнал от второго сдвоенного радиокомпандера.

Соответственно верхняя и нижняя боковые полосы радиоприемника *16* связаны с двумя сдвоенными приемными полукомплектами радиокомпандера посредством соединительных линий. Выход каждой линии подключен к фильтрам, выделяющим управляющие сигналы. Фильтр *17* (2820—3000 Гц) выделяет сигналы одного, фильтр *18* (3050—3230 Гц) второго компандера, а режекторный фильтр *19* (2820—3230 Гц) исключает попадание управляющих сигналов в полосу речевых подканалов. В управляющем подканале, как обычно, последовательно включены частотный демодулятор *20* и антилогарифматор *21*. В речевом подканале включен шифтер *22*, разделяющий речевые подканалы. Далее включены двухкаскадный регулятор замираний *23*, первый каскад которого является управляющим (подробно компрессору *6*), полосный дешифратор *24* и управляемый экспандер *25*.

При разборке системы CNL было уделено большое внимание анализу факторов, определяющих основные параметры аппаратуры. В связи с использованием «внутреннего» детектора огибающей компрессора (что позволяет применить два компрессора вместо трех) уточнен вопрос об оптимальной скорости компрессии и экспандирования, о выборе постоянных времени в канале управ-

ления, причем подчеркивается, что увеличение скорости компрессии ведет к расширению шумовой полосы управляющего канала. Шумы и помехи в канале управления вызывают паразитную амплитудную модуляцию огибающей речи, однако сужение полосы управления недопустимо по причине возрастания шумов компандирования, т. е. тех шумов, которые усиливаются компандером при запаздывании управляющих сигналов.

Существующее противоречие разрешается компрессором, причем постоянные времени установления (3 мс) и восстановления (13,5 мс) увеличены по сравнению с величинами, принятыми для неуправляемых компандеров (соответственно 1,6 мс и 5,0 мс).

Установлено, что регулятор замираний должен действовать медленнее компрессора, так как в противном случае он обеспечивает дополнительное сжатие сигналов, которое не компенсируется управляемым экспандером, что ведет к искажениям речи и колебаниям уровня.

В процессе теоретических исследований была дана оценка искажениям восстановленной огибающей речи, возникающим из-за шумов в управляющем канале, которые приводят к амплитудно-фазовой, а затем и паразитной частотной модуляции частотномодулированного управляющего сигнала. Паразитная ЧМ искажает частотномодулированный сигнал и на выходе частотного демодулятора наблюдаются хаотические искажения огибающей речи.

Данные, полученные в результате расчетов и измерений, представлены в МККР и учтены при разработке Рекомендации № 455, регламентирующей параметры системы «Линкомпекс».

Фирмой «Филипс» (Голландия) разработан в 1972 г. модем типа «Линкомпекс», выполненный в соответствии с Рекомендацией МККР № 455 [56]. Подчеркивается, что система «Линкомпекс» является улучшенной системой «Френа», разработанной ранее той же фирмой.

Функциональная схема радиокомпандера «Филипс Линкомпекс» серии *RY* 741 представлена на рис. 2.7. Радиокомпандер начинается с дифференциальной

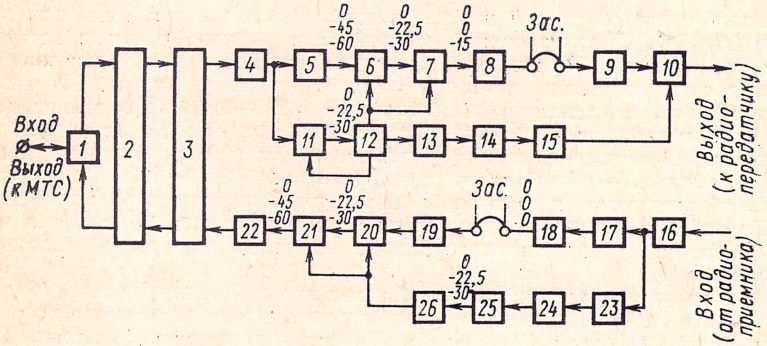


Рис. 2.7. Структурная схема радиокомпандера «Линкомпекс» («Филипс»)

системы *1*, согласующей двухпроводную телефонную линию междугородной сети (МТС) с четырехпроводной радиолинией. Далее, как обычно, включается эхо-заградитель *2*, работающий в облегченных условиях и обеспечивающий поэтому возможность абонентам перебивать друг друга в разговоре. Блоком *3* изображены вызывные приборы организации связи (передатчик и приемник вызова в сторону радиоканала и в сторону МТС). Затем блоки *4—15* представляют передающую сеть, а блоки *16—22* — приемную часть полукомплекта радиокомпандера. Передающая часть содержит элементы согласования *4*, а также речевой и управляющий подканалы. В речевом подканале включен блок предкомпрессорной задержки *5* (4 мс), предотвращающий появление выбро-

сов при управлении компрессором из-за запаздывания управляющего сигнала, выделяемого инерционно. Речевой сигнал сжимается до постоянного уровня двухкаскадным компрессором, каждый из одинаковых каскадов которого (*6* и *7*) обеспечивает коэффициент сжатия динамического диапазона 2 : 1 (значение уровней в трех точках диапазона компандирования проставлены на функциональной схеме тракта). Компрессированный сигнал проходит через линию задержки *8* (8 мс) и выходные цепи подключения засекречивающего устройства, ограничивается по полосе фильтром с полосой среза 2700 Гц (9) и поступает на суммирующий усилитель *10*, ко второму входу которого подводится управляющий сигнал.

Управляющий подканал начинается с компрессора *11*, аналогичного компрессорам *6* и *7*, причем управление всеми тремя компрессорами ведется с общего детектора огибающей *12*. Такое включение цепей управления обеспечивает одинаковое изменение усиления каждого из двух последовательно включенных компрессоров. Огибающая речи изменяется со слоговой частотой и соответственно изменяется усиление в компрессорах *6*, *7*, *11*, причем сокращается линейное усиление сигналов внутри каждого слога. На выходе детектора огибающей последовательно включаются интегратор, логарифматор и частотный модулятор. Поскольку диапазон изменения огибающей уменьшен компрессором *11* вдвое, логарифматор может быть упрощен и выполнен в виде активного элемента, имеющего логарифмическую амплитудную характеристику. Логарифмированный модулирующий сигнал обеспечивает при линейной частотной модуляции изменение частоты генератора *15* от 2960 Гц до 2840 Гц при изменении уровня на входе компрессора от —55 дБ до +5 дБм0; уровень тест-тона 0 дБм0 соответствует частоте 2850 Гц. В отсутствие речевых сигналов, шума и помех частота составляет приблизительно 2975 Гц. Выбор девиации частоты в 2 Гц на 1 дБ обусловлен тем, что любое небольшое расхождение по частоте между передатчиком и приемником приводит к одинаковому изменению уровня на всех амплитудах выходного сигнала радиокомпандера. Соответственно и искажения, обусловленные шумом и помехами в канале управления, будут равномерно распределены по диапазону амплитуд речи, не поражая только высокие или низкие уровни. Переходные помехи между речевым и управляющим подканалами подавляются низкочастотными фильтрами *10* и *13*. Объединенный сигнал (при сигнале управления на 5 дБ ниже уровня речи) направляется с усилителя *10* к модулятору однополосного радиопередатчика.

Выходной сигнал радиоприемника поступает с соединительной линии на согласующий усилитель *16* и расфильтровывается на речевой и управляющий подканалы фильтрами *17* (250—2700 Гц) и *23* (2,8—3,0 кГц). Выход фильтра *17* в речевом подканале подключен к выходу регулятора замираний, который сжимает входной уровень, ликвидируя быстрые замирания, так как цепь автоматической регулировки усиления в радиоприемнике предназначена только для борьбы с медленными замираниями. На выходе регулятора замираний *18* поддерживается сигнал постоянного уровня при изменениях входного уровня регулятора в пределах —15 и 7 дБ. Регулятор замираний выполнен в виде компрессора и отличается от компрессора *5*, *6* и *11* несколько увеличенной постоянной времени. Далее речевой сигнал задерживается в блоке задержки *19*, компенсирующем временно́е рассогласование подканалов (8 мс), или подается на засекречивающее устройство. Задержанный сигнал подается на двухкаскадный экспандер *20*, *21*. Выходной сигнал подобен входному сигналу компрессора, т. е. сильный звук остается сильным, а слабый — слабым. В этом принципиальное отличие от системы CNL, в которой слабый звук усиливается вместе с шумами, и качество речи страдает. Использование в управляющем подканале частотной модуляции позволяет использовать ограничитель амплитуд *24* для ликвидации селективных замираний (порог ограничения — 50 дБ). Ограниченные по амплитуде сигналы поданы на частотный дискриминатор *25*, с выхода которого поступает сигнал постоянного тока (с сохранением постоянной составляющей), изменяющейся в диапазоне амплитуд 0—30 дБ. Для восстановления исходного динамического диапазона этот сигнал подается на антилогарифматор *26*, который имеет амплитудную характеристику, обратную характеристике логарифматора *14*. Выходной сигнал антилогарифматора управляет двухкаскадным экспандером. Сигнал управления используется также в качестве контрольного тона, так

что при пропадании или недопустимом искажении его загорается сигнальная лампа на пульте оператора.

Поскольку радиокомпандер использует трансформаторную дифференциальную систему как переходный мост с двухпроводной на четырехпроводную линию (и наоборот) обеспечиваются постоянные потери (7 дБ) между исходящими линиями, которые соответствуют международным стандартам в проводной связи. До появления системы «Линкомпекс» невозможно было обеспечить постоянство затухания в точке сопряжения радиолиний с телефонным каналом. При разработке аппаратуры основное внимание уделено высокой технологичности узлов.

Регуляторы уровня в компрессорах и экспандерах выполнены бестрансформаторными, частотный детектор выполнен в виде счетчика импульсов, линии задержки изготовлены на тонких пленках в виде реостатно-емкостного регистра сдвига аналоговых сигналов, в каждой ячейке которого включен транзистор.

Интересно отметить, что ранее той же фирмой «Филипс» был разработан управляемый компандер для сжатия динамического диапазона вещательных сигналов [57, 58], передаваемых в качестве программ вещания из студий к удаленным радиостанциям. При передаче программ вещания по линиям дальней кабельной и радиорелейной связи управляемый компандер может эффективно использоваться, но для этого случая он должен обладать рядом особенностей. Вещательный компандер обеспечивает преобразование музыкальных и других звуковых сигналов в полосе 30—15000 Гц. На рис. 2.8 показана передающая

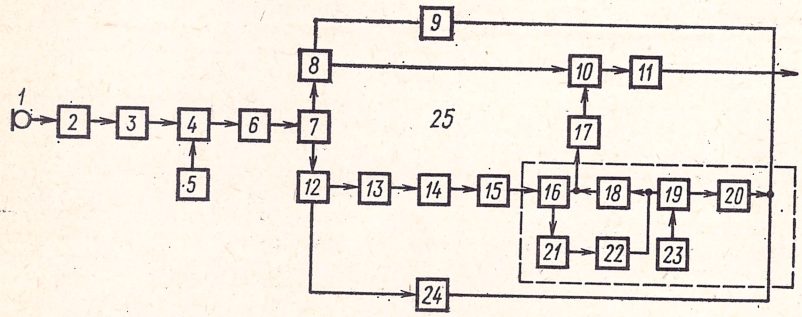


Рис. 2.8. Структурная схема вещательного управляемого компрессора (Блоки, обведенные пунктиром, образуют блок 26)

часть вещательного управляемого компандера, расположенного непосредственно в радиостудии. Звуковые сигналы с микрофона *1* через фильтр (30—15 000 Гц) и усилитель *2* и *3* поступают в однополосный модулятор *4* (с генератором *5*), который переносит сигналы в полосу 00,03—103 кГц. Затем сигнал фильтруется фильтром *6*.

Сформированный однополосный сигнал после необходимых преобразований усиливается усилителем *11* и поступает на выход устройства. Преобразователь *25* обеспечивает сжатие динамического диапазона сигналов в цепи между фильтром *6* и усилителем *11*, где включены управляемый регулятор затухания *10* и другие блоки, обеспечивающие регулировку затухания. Управляющий подканал начинается с разветвителя *7* и образуется усилителем *13*, детектором огибающей *14* и фильтром *15* с частотой среза 200 Гц. Сигнал управления формируется в блоке *26* за пределами полосы звуковых сигналов и подается совместно со звуковым сигналом через разветвитель *8* и регулятор *9* на управляемый регулятор затухания *10*, а также через регулятор *24* и разветвитель *12* на вход управляющего канала. При увеличении уровня звуковых сигналов на входе детектора *14* увеличивается напряжение на входе вычитателя *16*, выход которого подключен к частотному модулятору, выполненному в виде генератора *22*. Выход генератора связан через частотный детектор со вторым входом вычитателя, так что посредством изменения частоты оказывается возможным сжать диапазон изменения амплитуд управляющего сигнала, уменьшая усиление сигнала огибающей звука. Наоборот, при уменьшении уровня сигнала огибающей с выпрямителя *14*

частота генератора *22* уменьшится и будет соответственно уменьшаться выходной сигнал демодулятора *18*, что приведет к увеличению уровня управления. Поскольку выход частотного демодулятора подключен через цепь задержки *17* к управляемому регулятору, то обеспечивается компрессия звуковых однополосных сигналов.

Частотномодулированный управляющий сигнал образуется на частоте 6,6 кГц и посредством преобразователя *19* с генератором *23* и фильтром *20* переносится в полосу 85,1—86,6 кГц. Таким образом, управляющий канал занимает полосу частот в 1500 Гц и вводится в тракт звуковых сигналов через регулятор *9*, чем достигается усиление управляющих сигналов во время пауз в звуковом канале. Общий участок частотного диапазона системы около $\Delta F = 103—85{,}1 \approx 20$ кГц.

На рис. 2.9 показана приемная часть компандера. На вход *27* поступают звуковой и управляющий сигналы, усиливаются усилителем *28* и через разветвитель *29* поступают на канальные фильтры *42* и *30*. Звуковой сигнал с фильтра *30* (полоса 88,03—103 кГц) через разветвитель *31* поступает на включенные по-

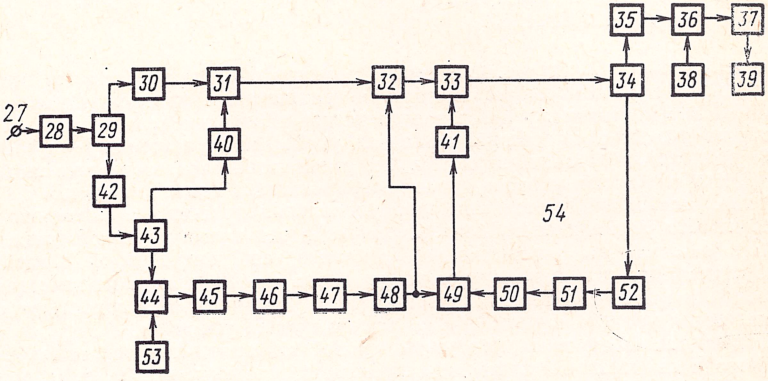


Рис. 2.9. Структурная схема вещательного управляемого экспандера

следовательно управляемые регуляторы уровня *32* и *33*, входящие в состав экспандера *54*. Далее сигнал подается через разветвитель *34* на однополосный демодулятор, состоящий из последовательно включенных фильтра *35*, преобразователя *36* с генератором *38*, низкочастотного фильтра *37*, усилителя *39* с акустическим устройством.

Управляющий сигнал с фильтра *42* через разветвитель *43* и регулируемый усилитель *40* добавляется в звуковой подканал, а с другого выхода разветвителя поступает на преобразователь *44* с генератором *53* и фильтром *45* (полоса 5,1—6,6 кГц). Далее сигнал через выравниватель *46* и ограничитель уровня *47* следует на частотный детектор *48* и затем в цепь управления регулятора *32*, а также на вычитатель *49*, на второй вход которого поступает управляющий сигнал, выделенный через усилитель *52*, детектор *51* и сглаживающий фильтр *50*. Сигнал, пропорциональный разности двух управляющих напряжений, через низкочастотный фильтр подводится к управляющему входу управляемого регулятора *33*.

Основной отличительной особенностью данной системы является то, что мощность передатчика всегда используется полностью, независимо от наличия или отсутствия пауз, причем во время присутствия речевого сигнала передатчик, в основном, загружается звуковым сигналом, а во время пауз соответственно возрастает уровень управляющего сигнала. Таким образом, за счет перераспределения мощности передатчика между сигналами звукового и управляющего подканалов обеспечивается повышенная помехозащита паузы — наименее защищенного от помех интервала вещательной программы.

На рис. 2.10 иллюстрируются изменения выходных уровней управляющего и звукового сигналов (кривые *а* и *b* соответственно) в зависимости от изменения входного уровня звукового сигнала, приложенного ко входу компандера. (Начальные точки рабочего режима устанавливаются вручную посредством регуляторов *15* и *16* так, чтобы уровень управляющего сигнала составлял 31 дБ, а уровень звукового — 26 дБ при максимальном уровне входного звукового сигнала). При работе компрессора уровень звукового сигнала меняется незначительно до тех пор, пока он не становится сравнимым с уровнем управляющего сигнала, а затем (точка *P*) наблюдается резкое перераспределение уровней подканалов на выходе компрессора. Диапазон управления (участок *P* — *Q*) составляет 32 дБ, причем уровень звуковых сигналов возрастает соответственно лишь на 6 дБ, в то время как уровень управляющего сигнала падает на 26 дБ.

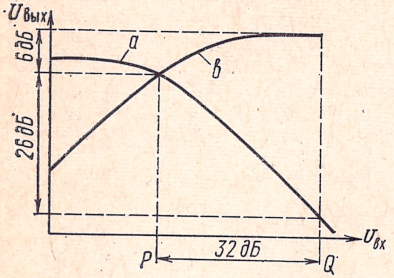


Рис. 2.10. Изменения выходного уровня $U_{вых}$ управляющего (*а*) и звукового (*b*) сигналов при изменении уровня входного звукового сигнала $U_{вх}$

Такое уменьшение уровня сигналов управления приводит к снижению помехоустойчивости управляющего канала, однако в это время звуковой сигнал усиливается максимально, что несколько компенсирует указанный недостаток. Во всяком случае, при испытаниях системы установлено, что снижение качества воспроизведения заметно лишь на линии дальней связи протяженностью свыше 2500 км, когда уровень шума в управляющем канале увеличен.

Следует также отметить, что управляющий сигнал изменяется одновременно по уровню и по частоте: причем эти изменения противоположны, т. е. при увеличении уровня звука сигнал управления уменьшается по уровню и возрастает по частоте, а при уменьшении уровня звука сигналы управления растут по уровню и уменьшаются по частоте. Это условие позволяет использовать двухкаскадный экспандер с цепями управления по частоте *54* и по амплитуде *21*, что повышает помехоустойчивость канала управления. Однако точность взаимодействия двух цепей управления требуется поддерживать высокой, так как нарушение взаимодействия вызывает заметные искажения музыкальных сигналов. Временное взаимодействие звуковых и управляющих сигналов достигается увеличением скорости регулирования (полоса управления 200 Гц) и включением линии задержки *53* (1,5 мс) на передаче. Недостатком такого включения (отсутствие предкомпрессорной задержки звука) является появление запаздывания регулирования, что ведет к появлению амплитудных выбросов в начале компрессии каждого слога.

Следствием упрощения является недостаточная помехоустойчивость, так как отсутствие предэкспандерного регулятора замираний исключает использование данной системы в радиоканалах с замиранием.

Анализ зарубежных модемов радиотелефонии свидетельствует о том, что принцип передачи речевых сигналов методом управляемого компандирования интенсивно изучается во всех промышленно-развитых странах. Эффективность метода доказана рядом разработок. Вследствие этого появились модификации, различные по выполнению и электрическим параметром, что исключает совместимость систем разных стран на международных радиолиниях (например, полоса управляющего подканала, девиация частоты, диаграммы уровней, постоянные времени компандеров и т. д.).

Поэтому выявилась необходимость международной стандартизации параметров системы «Линкомпекс».

Второй важный вывод, который вытекает из обзора зарубежных радиокомпандеров, сводится к тому, что все разработки предусматривают включение но-

вого модема в существующий радиотелефонный тракт без учета новых возможностей по совершенствованию традиционных методов организации и эксплуатации радиолиний. В то же время метод управляемого командирования позволяет по-новому решить традиционные задачи эхоподавления и вызова, т. е. усовершенствовать полный радиотелефонный канал связи. Такое усовершенствование выполнено при разработке отечественного радиокомпандера.

2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РАДИОКОМПАНДЕРОВ

Линейные испытания радиокомпандеров в разных странах были представлены в МККР в виде вкладов и обобщены в отчете № 354—1 по вопросу 13/3 [59], который ставит задачу улучшения качества работы радиотелефонных линий, в частности, в результате применения компандеров.

Документ 111/7 (Соединенное Королевство) содержит сведения о результатах опытной эксплуатации радиокомпандера. Экспериментальная аппаратура была испытана в рабочих условиях на оконечных станциях радиолинии «Лондон — Нью-Дели». Аппаратура «Линкомпекс» и обычные оконечные устройства применялись на каналах A1 и B1 радиосистемы (декабрь 1964—апрель 1965).

Линия, оборудованная аппаратурой «Линкомпекс», позволяла получать гораздо бо́льшее коммерческое время, чем стандартный радиоканал, причем средние дневные коммерческие сеансы составляли 6,6 и 5,8 ч (увеличение 14%). В течение 12-недельного периода, когда каналы систематически чередовались (весь период испытания составлял 17 недель), соответствующие значения составляли 6,2 и 5,2 ч в день (увеличение 19%).

Однако следует упомянуть о том, что независимо от протяженности коммерческой линии немаловажным свойством являлась большая потенциальная емкость канала, оснащенного аппаратурой «Линкомпекс», благодаря более «ровному» течению речи операторов и абонентов, что позволяет работать без заградителей от обратной связи. Это было продемонстрировано во время четырехнедельного периода наблюдений, когда особое внимание было обращено на качество разговоров. Из всех наблюдаемых разговоров 70% были признаны «отличными» или «хорошими» в каналах «Линкомпекс», причем соответствующее значение качества в обычном канале составляет 58%. Улучшение особенно было заметным на транзитных вызовах, проходящих по кабельным линиям большой протяженности.

Документ III/19 (Япония), 1966—1969 описывает полевые испытания радиоконечного оборудования, использующего те же принципы, что и «Линкомпекс». Приведены результаты сравнений характеристики линии протяженностью 600 км между Токио и Осака с новой аппаратурой и с обычной аппаратурой Vodas. Были проведены отдельные серии испытаний и результаты можно суммировать следующим образом:

—58,6% наблюдателей дали «отличную» оценку цепи при использовании новой аппаратуры по сравнению с 31% при использовании старой аппаратуры;

—47% наблюдателей сказали, что при использовании новой оконечной аппаратуры цепь была такой же хорошей, как и обычная кабельная или микроволновая цепь, а 51% наблюдателей считали, что она несколько хуже обычных линейных цепей между Токио и Осака.

В испытаниях 1967 г. при первом сравнении (февраль) 29 человек оценивали качество речи по тестам и слоговой артикуляции. Результаты, представленные в табл. 2.6, показывают, что система «Линкомпекс» обеспечивает значительное улучшение обоих параметров по сравнению со стандартным оборудованием радиоканала.

ТАБЛИЦА 2.6

Вид испытаний	Оценка	Процент слушателей	
		«Линкомпекс»	Стандартная система
Оценка теста	4 — отлично	58,6	31,0
	3 — хорошо	34,4	37,9
	2 — удовлетворит.	5,2	13,8
	1 — плохо	1,8	13,8
	0 — неприемлемо	0	3,5
Учет повторения при диалоге	Частость повторений	$0{,}4 \cdot 10^{-2}$	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$

В следующих испытаниях (август) 85 человек вели контрольные переговоры. В табл. 2.7 приведены суммарные оценки, полученные путем опроса абонентов после переговоров. Как видно из табл. 2.7, 98,8% абонентов высказали мнение, что радиоканал «Линкомпекс» обеспечивает почти то же качество речи, что и обычный телефон на кабельных или радиорелейных каналах связи.

ТАБЛИЦА 2.7

Вид испытаний	Оценка	Процент абонентов
Сравнение с телефоном наземной сети	Неотличимо от телефона	47,0
	Несколько хуже, чем телефон	51,8
	Много хуже, чем телефон	0
	Мнение не сформировано	1,2

В документах III/7 (Соединенное Королевство), III/30 (Южно-Африканская Республика), 1966—1969 даются сведения о преимуществах, достигнутых с помощью «Линкомпекс».

Документ III/7 (Соединенное Королевство) обобщает результаты специальных наблюдений, проведенных квалифицированным

персоналом на линиях «Лондон — Найроби» и «Лондон — Иоганнесбург». Были проведены сравнения между каналом, оборудованным новой аппаратурой, и обычным каналом в той же четырехканальной группе.

Результаты можно обобщить следующим образом:

увеличение числа вызовов по сравнению с обычными каналами	100%,
увеличенное оплачиваемое время за вызов	6% (88% до 94%),
увеличенная средняя продолжительность вызова	6%,
процент вызовов с оценкой «нормальный» увеличен на	25% (60% до 85%).

Эта значительно увеличенная эффективность радиосвязи была достигнута при пониженном внимании со стороны эксплуатационного оператора, причем считалось практически возможным, чтобы «входящий» оператор не принимал участия после того, как вызываемый номер был набран, оставляя «выходящего» оператора контролировать вызов. Важно заметить, что процент оплаченного времени за вызовы в настоящее время достаточно высок, чтобы устранить необходимость в наблюдении.

Документ III/29 (США) обобщает улучшения, которые были достигнуты при использовании аппаратуры «Линкомпекс» с июля 1966 г. С тех пор между США и другими странами была установлена регулярная коммерческая связь с использованием одной или более систем «Линкомпекс». Реакция потребителя была быстрая и одобрительная (при хорошем прохождении разговора и отсутствии шума).

Один или два канала, оснащенных аппаратурой «Линкомпекс», были предназначены для определенной четырехканальной радиосистемы. Таким образом, увеличение коммерческого времени нельзя было наблюдать на любой заданной частоте, т. е. обычно оборудованные каналы требуют частой смены частот, которые приходилось делать до включения каналов с компандированием. Однако наблюдалось, что при контролировании вновь оборудованных цепей они продолжали действовать длительное время, после того как обычные радиоканалы было невозможно использовать. Оцененное увеличение времени используемой цепи составляло от 16 до 20%.

Анализ нагрузки по пучку соединительных линий, имеющих каналы, оснащенные аппаратурой «Линкомпекс» на одной или более линиях, показывает следующее:

— канал, оборудованный аппаратурой «Линкомпекс», передавал 26% от общего числа вызовов в 12-канальном пучке соединительных линий — почти столько же, сколько последующие три наиболее занятых канала в пучке;

— обеспечивалось увеличение минут, оплаченных на вызов по каналу, оборудованному аппаратурой «Линкомпекс» до 16,5%;

— канал «Линкомпекс» составлял 29% оплачиваемых минут в 12-канальном пучке соединительных линий.

Документ III/30 (ЮАР) останавливается на преимуществах, которые были достигнуты при использовании аппаратуры «Лин-

компекс» на линии «Иоганнесбург — Лондон» за период сентябрь 1967 — май 1968. Он обращает внимание на возможность сокращения штата, поскольку почти не требуется управления аппаратурой. Прием передач специальных новостей обычно при использовании «Линкомпекс» был такого высокого качества, что можно было передавать программу в радиовещательную сеть без дальнейшей обработки или повторного считывания на месте, как делалось ранее.

В табл. 2.8 приведены результаты, из которых можно видеть, что цепь, оборудованная аппаратурой «Линкомпекс», обеспечивает почти в два раза больше обмен, чем обычная связь в течение четырех месяцев.

ТАБЛИЦА 2.8

Система	Число передаваемых вызовов					Продолжительность вызовов, мин		Средняя продолжительность, мин	Процент эффективного времени
	январь	февраль	март	апрель	общее	общая	эффективная		
«Линкомпекс»	719	633	1198	1244	2794	1557[4]	15478	5,57	99,38
Стандартный ТЧ канал	377	336	27	719	1459	783[6]	7518	5,37	95,94

Считая, что рабочее время канала, оборудованного аппаратурой «Линкомпекс», больше рабочего времени обычного радиоканала и что в течение марта было передано 241 вызов по цепи «Линкомпекс» в течение такого прохождения, когда стандартная цепь не могла быть включена, сделан вывод, что цепь, оборудованная аппаратурой «Линкомпекс», передавала в среднем приблизительно на 25% больше обмена, чем нормальная цепь за тот же период времени.

По-видимому, причина бóльшего обмена, обеспечивающего производительность цепи, оборудованной аппаратурой «Линкомпекс», заключается в том, что операторам требуется меньше времени для организации связи (вызова).

В табл. 2.9 приведено относительное качество связи новой системы в период от 07.00 до 20.00 по среднегринвичскому времени, когда условия распространения стабильные (оценки по пятибалльной шкале).

ТАБЛИЦА 2.9

Система	Хорошее качество, без шума, %	Незначительный шум, коммерческая связь, %	Шум, некоммерческая связь, %	Незначительные помехи, коммерческая связь, %	Некоммерческая связь из-за повреждений, %	Общее коммерческое время, %
«Линкомпекс»	92	3,9	1,2	0	2,9	95,9
Стандартная	66,7	24,6	4,1	1,7	2,9	93,0

Заметное улучшение при использовании канала, оборудованного аппаратурой «Линкомпекс», обусловливается «легкостью» раз-

говора и отсутствием обычного шума радиолинии вследствие действия компандера. Операторы радиолиний единодушно отмечают повышение качества связи.

Для определения степени улучшения времени обмена, которое можно было бы ожидать от использования аппаратуры «Линкомпекс», в течение суток проводились специальные испытания (табл. 2.10).

ТАБЛИЦА 2.10

Время (среднее по Гринвичу)	Система	Процент сеансов за цикл измерения						
		Хорошее качество без шума	Незначительный шум, коммерческая связь	Шум, некоммерческая связь	Незначительные помехи, коммерческая связь	Помехи, коммерческая связь	Некоммерческая связь	Общее коммерческое время
00.00 до 06.00	«Линкомпекс»	57,3	19,7	15,0	1,2	0	6,8	78,2
	стандартная	7,6	22,5	15,9	1,5	46,3	6,8	31,6
06.00 до 18.00	«Линкомпекс»	96,54	1,3	1,0	0	0	1,3	97,7
	стандартная	70,0	26,6	2,1	0	0	1,3	96,6
18.00 до 24.00	«Линкомпекс»	57,2	24,6	8,4	0,4	1,1	8,3	82,2
	стандартная	7,7	32,3	22,2	0	29,5	8,3	40,0

Хотя цепь, оборудованная аппаратурой «Линкомпекс», практически не давала никакого улучшения коммерческого времени по сравнению с нормальной цепью во время сеансов между 06.00 и 18.00, она обеспечивала цепь, которая не имеет шума в течение бóльшего процента имеющегося времени. В течение менее стабильных периодов 00.00 до 06.00 и 18.00 до 24.00 среднегринвичского времени канал «Линкомпекс» является лучшим при обеспечении цепи, которая не только не имеет шумов в течение бóльшего процента времени, но также является коммерческой в течение бóльшего процента времени.

Отчет заканчивается обобщением достигнутых улучшений:

— меньшее время, необходимое оператору для передачи деталей о заказанных вызовах и, следовательно, бóльшая емкость обмена;

— более «легкий» разговор и, следовательно, меньший процент эффективного времени занятия цепи;

— передача последних известий такого качества, которое позволяет ретранслировать их радиослушателям, устраняя необходимость в повторном считывании на месте диктором;

— облегчение обслуживания связи;

— минимум внимания со стороны технических операторов.

2.4. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РАДИОКОМПАНДЕР АРКА

При разработке советского радиокомпандера ставилась задача сопряжения в «эфире» с зарубежными системами типа «Линком-

пекс» и проектирования современного радиотелефонного тракта с учетом специфики метода управляемого компандирования.

Если первая часть задачи решается путем обеспечения электрических параметров модема в соответствии с Рекомендацией МККР № 455, то вторая ее часть потребовала поисков новых технических решений. В процессе разработки были уточнены некоторые параметры радиокомпандера, определены режимы его эксплуатации и требования к каналу связи [11].

Структурная схема макета радиокомпандера, разработанного в НИИР, представлена на рис. 2.11. Оконечный полукомплект аппа-

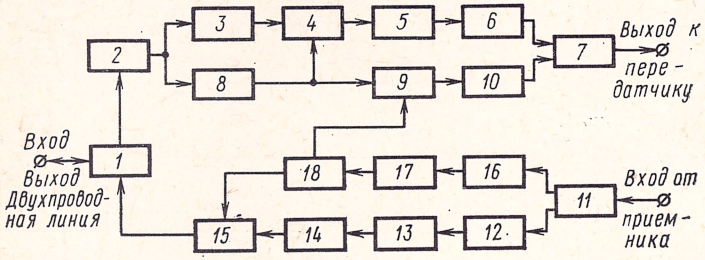


Рис. 2.11 Структурная схема советского радиокомпандера

ратуры состоит из двухканального приемно-передающего модема радиотелефонной связи. Как обычно, на входе устройства включена дифференциальная система *1*. Тракт передачи начинается с фильтра *2* (300—2700 Гц) и разветвляется на речевой (блоки *3*—*6*) и управляющий (блоки *8*—*10*) подканалы.

В речевом подканале последовательно включены блоки предкомпрессорной задержки *3*, управляемого компрессора *4*, блока задержки передачи *5* и фильтра *6* (300—2700 Гц). В управляющем подканале последовательно включены детектор огибающей *8*, частотный модулятор *9* и фильтр *10* (2700—3000 Гц). Сигналы с выходов речевого и управляющего подканалов линейно складываются на входе усилителя *7* и транслируются на радиопередатчик. Соответственно на приеме после усилителя *11* в речевом подканале последовательно включены фильтр *12* (300—2700 Гц), регулятор замираний *13*, блок задержки приема *14* и управляемый экспандер *15*. Управляющий подканал содержит последовательно включенный фильтр *16* (2700—3000 Гц), ограничитель *17* и частотный детектор *18*, выходной сигнал которого поступает на управляющий вход экспандера *15*.

Особенности отечественного радиокомпандера не нарушают внешних параметров системы, регламентированных Рекомендацией МККР № 455, а сводятся лишь к изменению таких характеристик, которые повышают эффективность функционирования аппаратуры при обеспечении совместимости с зарубежными системами в «эфире».

Так, для повышения помехоустойчивости и упрощения оборудования вместо функционально выделенного блока эхо-заградителя, представляющего собой сложное устройство, между выходом частотного демодулятора *18* и входом частотного модулятора *9* введена соответствующая цепь эхоподавления (см. рис. 2.11). Таким образом, во время разговора дальнего абонента запирается приемный тракт путем передачи с ближнего конца канала частоты «молчания» 2960 Гц, что исключает не только возникновение эхо-эффекта, но и облегчает ведение разговора за счет подавления помех или шумов в тракте приема [60]. (Экспандер дальнего конца заперт до тех пор, пока детектор огибающей ближнего конца не зафиксирует поступление речевого сигнала).

Испытания введенной цепи показали, что даже при наличии на передаче входного сигнала с динамическим диапазоном 40 дБ наблюдается полное запирание экспандера дальнего абонента в моменты времени, когда уровень принимаемых сигналов превышает уровень передачи на ближнем конце. Этот эффект равноценен внесению эхо-заградителем затухания до 60 дБ в канале говорящего абонента на передаче. В отличие от стандартных эхо-заградителей, которые управляются речевыми сигналами в полосе телефонного канала, цепь эхоподавления управляется узкополосными сигналами с частотной модуляцией, что, естественно, повышает помехоустойчивость срабатывания и исключает ложные переключения, нарушающие речевой диалог абонентов.

Второй особенностью советского радиокомпандера является повышенная стабильность управляющего сигнала, достигнутая путем применения дискретного частотного модулятора, задающим генератором которого служит неуправляемый кварцевый генератор [61]. Повышение стабильности управляющего сигнала достигнуто повышением технологичности аппаратуры, т. е. отпала необходимость в термостатированных управляемых аналоговых генераторах или мультивибраторах. Применение дискретного частотного модулятора позволило обеспечить кварцевую стабилизацию частоты «нулевого уровня» (2960 Гц), т. е. гарантировать подавление шумов в паузах, получить контрольную частоту для проверки радиотелефонного тракта и заменить аналоговые регулируемые элементы элементами двоичной логики, которые не нуждаются в регулировке и выполняются на дешевых кремниевых транзисторах. Модуляционная характеристика подканала передачи огибающей речи линейна при изменении уровня входного сигнала в заданном динамическом диапазоне — 5—60 дБ.

При испытаниях радиокомпандера с выходом на городскую телефонную сеть выяснилось, что возможна работа в полосе частот 300—2700 Гц (МККР рекомендует полосу 250—2700 Гц). Сокращение рабочей полосы радиокомпандера на 50 Гц в нижней части спектра практически не отражается на качестве речи, но позволяет снизить уровень шума на входе радиоканала. Поскольку допустимая неравномерность АЧХ передатчика и приемника составляет обычно не менее 6 дБ (3 дБ — передатчик, 3 дБ — при-

емник), то для исключения заметности частотных искажений соответствующие значения для радиокомпандера должны быть порядка 3 дБ на комплект (передача — прием) в полосе 300—2700 Гц.

Введение дискретного частотного модулятора потребовало выяснения вопроса о необходимом числе дискретных уровней при передаче огибающей речи. Были проведены соответствующие лабораторные и линейные испытания. При лабораторных испытаниях оценивалось качество речи двадцатью нетренированными слушателями методом парных сравнений (женский голос). Речь записывалась с телефонного аппарата. После обработки на вычислительной машине «Минск-20» исходного отрезка речи по программе, моделирующей работу радиокомпандера, был получен речевой сигнал, соответствующий выходному сигналу радиокомпандера. В результате было установлено, что 85% слушателей не отмечают ухудшения речи при числе уровней огибающей не менее восьми. Семиуровневый частотный модулятор в составе радиокомпандера был испытан на коммерческих радиолиниях «Москва — Нью-Йорк» и «Москва — Монреаль». На другой стороне радиолинии использовалась аппаратура «Линкомпекс». Испытания подтвердили возможность совместной работы испытываемой и зарубежной аппаратуры.

Важным эксплуатационным параметром радиокомпандера является допустимая частотная нестабильность (рассинхронизация) в канале связи. Поскольку влияние рассинхронизации сказывается, в основном, на смещении управляемого ЧМ сигнала по частоте, при испытаниях производилось контролируемое смещение частоты управляющего сигнала. Результаты испытаний представлены в табл. 2.11, из которой следует, что при величине рассинхронизации

ТАБЛИЦА 2.11

№ замера	Рассинхронизация, Гц	Частота, Гц	Регистрируемое изменение качества речи
1	—22	2958	Незначительное увеличение громкости без артикуляционных искажений
2	—44	2936	Заметное увеличение громкости без значительных искажений речи
3	—66	2914	Значительное увеличение громкости с искажением громких слогов
4	+22	2936	Незначительное уменьшение громкости без артикуляционных искажений
5	+44	2953	Заметное уменьшение громкости с незначительным искажением взрывных звуков
6	+66	2980	Значительное уменьшение громкости с искажением речи

±20 Гц качество речи остается приемлемым для коммерческой связи. Следует, однако, отметить, что указанные в таблице данные

относятся к случаю отсутствия шумов, и поэтому на реальной линии допустима значительно меньшая рассинхронизация.

Наконец, представляет интерес оценить слоговую разборчивость речи при различных отношениях сигнал/шум в канале связи. На рис. 2.12 показана зависимость слоговой разборчивости от отношения сигнал/шум в канале связи для радиокомпандера и для телефонного аппарата городской сети с полосой пропускания 300—3400 Гц. Графики получены при лабораторных испытаниях с использованием одинаковых артикуляционных таблиц.

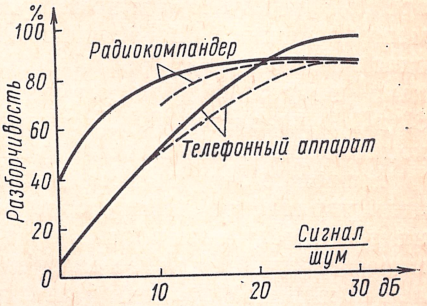


Рис. 2.12. Зависимость разборчивости от отношения сигнал/шум

Сопоставление графиков показывает, что при малых шумах лучшее качество речи обеспечивается обычным телефоном. При возрастании шумов радиокомпандер обеспечивает бóльшую разборчивость речи.

При весьма больших шумах следует ожидать, что радиокомпандер вновь будет проигрывать по сравнению с обычным телефоном, поскольку происходит интенсивное разрушение подканала передачи огибающей, вызывающее появление импульсных помех. Человеческий слух лучше адаптирован к гладкой шумовой помехе, чем к импульсной. Таким образом, применение радиокомпандера эффективно лишь при отношении сигнал/шум 10—20 дБ.

Для сравнения на рис. 2.12 представлены соответствующие графики (пунктир) для японского варианта аппаратуры «Линкомпекс» [53]. Сопоставление показывает, что на уровне разборчивости 75—80% применение радиокомпандера обеспечивает выигрыш по отношению сигнал/шум 12 дБ. Применительно к КВ радиолиниям такой выигрыш может обеспечить большой экономический эффект за счет использования передатчиков меньшей мощности.

Сделанный выше вывод подтверждается результатами линейных испытаний. При передаче одинаковых артикуляционных таблиц по «тяжелому» радиоканалу (двухполосное радиооборудование) с компандером и без него величина слоговой разборчивости была получена равной соответственно 83 и 69%. Сравниваемые режимы работы чередовались. При работе с радиокомпандером речевые помехи от соседних радиостанций практически полностью подавлялись.

Таким образом, применение метода управляемого компандирования в радиотелефонии существенно повышает качество связи. Повышение качества радиосвязи происходит за счет увеличения эквивалентного отношения сигнал/шум, подавления шума в паузах речи и исключения «радиоакцента» канала (станционные помехи и замирания). Отечественный радиокомпандер с эхо-заградителем

и пультом оператора совместим с радиотелефонной аппаратурой типа «Линкомпекс».

В последующем были проведены дополнительные исследования по оценке качества речи и уточнению параметров управляемого компандера [62]. Исследовалось влияние уменьшения постоянной времени на качество и помехоустойчивость речи и оценивалась помехоустойчивость передачи огибающей. В эксперименте использовался компандер с прямой регулировкой, линейным детектором в цепи управления и динамическим диапазоном по входу около 60 дБ. В диапазоне 60 дБ отклонение амплитудной характеристики компандера от линейности не превышало ± 1 дБ.

В первую очередь исследовалось влияние постоянной времени в цепи управления компрессора на качество звучания речевого сигнала. Ранее указывалось, что для получения минимального динамического диапазона ее следует уменьшать. Однако при очень малой постоянной времени в спектре управляющего напряжения оказываются значительные по величине гармоники основного тона и его комбинационные составляющие. В этом случае неизбежны заметные нелинейные искажения речевого сигнала. Грубую оценку для минимальной постоянной времени можно получить, рассмотрев спектральный состав модуля речевого сигнала. Измерения показывают, что в его спектре можно выделить три области: область огибающей (до 20 Гц), в которой сосредоточена основная (более 90%) энергия огибающей, область частот основного тона и комбинационных составляющих (от 60 до 50 Гц) и область частот сигнала. Две последние области перекрываются, поскольку нижняя частота телефонного сигнала составляет 300 Гц. Энергия огибающей в области частот основного тона значительно (в 20—40 раз) меньше, чем в области огибающей. Поэтому следует ожидать, что при постоянных времени, превышающих 0,5 мс, нелинейные искажения в речевом сигнале будут еще незаметными.

В эксперименте постоянная времени изменялась от 0,6 до 10 мс. Обязательным условием получения хорошего качества при компрессировании речи являются монотонность переходной и линейность фазовой характеристики сглаживающего фильтра в цепи управления. С другой стороны, этот фильтр должен обеспечивать в достаточной степени подавление составляющих основного тона. В компрессоре использован сглаживающий *RC*-фильтр первого порядка. Эксперимент показал, что при минимальной постоянной времени, равной 0,6 мс, с влиянием составляющих основного тона на управляющее напряжение можно не считаться. В то же время переходная характеристика такого фильтра не ухудшает качества звучания.

Задержка управляющего сигнала, вносимая фильтром нижних частот, приводит к появлению выбросов на выходе компрессора после пауз. Обычно эту задержку считалось необходимым компенсировать в цепи звукового сигнала. Исследования показывают, что для речевых сигналов при постоянных времени, не превышающих 6 мс, необходимости в такой компенсации нет, поскольку ограни-

чение амплитуды выброса в канале на слух незаметно. При больших постоянных времени компенсация необходима.

Для суммарной оценки действия всех перечисленных искажающих факторов было проведено сравнение речи компандированной с постоянной времени 6 и 0,6 мс и естественной речи в канале с полосой 250—3000 Гц методом парных сравнений. Каналу с компандером при постоянной времени 6 мс было отдано предпочтение в 45% случаев; каналу с компандером при постоянной времени 0,6 мс предпочтение было отдано в 50% случаев. Это свидетельствует о психологической неразличимости компандированной и естественной речи.

Поскольку управляемое компандирование требует передачи огибающей, было интересно исследовать, нельзя ли управляющий сигнал, поступающий на экспандер, подвергнуть бóльшему частотному ограничению, чем сигнал в компрессоре. Были проведены парные сравнения для постоянных времени экспандера, равных 4,5 и 9; 4,5 и 18 мс, при постоянной времени компрессора 2,4 мс. При этом статистические оценки суждения в пользу постоянных времени 9 и 18 мс по сравнению с 4,5 мс получились равными 0,42 и 0,33 соответственно, т. е. отличия практически отсутствовали. При бóльших постоянных времени изменения звучания становятся заметными.

При управляемом компандировании выигрыш в помехоустойчивости определяется двумя факторами. Во-первых, поднимается средняя мощность разговорных сигналов, имевших низкий уровень на входе компрессора. Во-вторых, благодаря малой постоянной времени компрессора уровни согласных звуков поднимаются до уровня гласных и меньше маскируются шумами. Выигрыш в помехоустойчивости, который можно получить благодаря первому фактору, зависит от тех ограничений, которые накладываются каналом при передаче. Наибольшим он получается для радиоканалов, где обычно ограничивается пиковая мощность. В каналах проводной связи, как правило, ограничивается средняя мощность. Поэтому для сигналов с мощностью, превышающей среднюю, при применении компрессора снижается защищенность от шумов.

Существенный выигрыш получается только при малой постоянной времени. Этот выигрыш определялся экспериментально. Методика была следующей. Слушателям, тренированным на подобных испытаниях, предъявлялись попарно отрывки текста, из которых они должны были выбрать предпочтительные. Один из сигналов в паре получался в результате суммирования естественной речи и шума, другой был суммой компрессированной речи и шума, прошедших через экспандер. Речевой сигнал диктора был монотонным. В канале огибающей шум отсутствовал. Меняя уровень шума в канале с естественной речью, оператор определял тот уровень, при котором слушатель перестает предпочитать компрессированный сигнал. Эксперимент проводился при шумах, пиковый уровень которых совпадал с уровнем компрессированного сигнала.

Уровни компрессированного и естественного сигналов выравнивались по пиковым значениям.

Средняя величина выигрыша, который дает звуковой предельный компрессор в этих условиях, оказалась равной 18 дБ.

Превышение пикового уровня над средним в компрессированном сигнале при постоянной времени 2 мс составляет около 10 дБ. То же превышение для монотонной речи составляет около 14 дБ. Следовательно, при равенстве пиковых уровней в нашем случае разница в средних уровнях составляет около 4 дБ. Таким образом, выигрыш в помехоустойчивости за счет управляемого компандирования составляет 14 дБ (при равенстве средних значений).

Помехоустойчивость передачи огибающей определялась экспериментально следующим образом. Естественный речевой сигнал умножался на сумму постоянного напряжения и шума в полосе огибающей. Это эквивалентно введению шума «в огибающую» при компандировании и выключению шума в паузе. Исключение шума в паузе позволяет устранить маскировку основного фактора. Слушателям предъявлялись парные отрывки речи, в одном из которых огибающая была с шумом, а в другом этот шум отсутствовал. Громкости сигналов были выровнены. Оператор определял уровень шума, при котором отличия сигналов в паре становились заметными. Оказалось, что для огибающей уже при отношении сигнал/шум, равном двум, влияние шума незаметно. Это означает, что шум в канале огибающей практически воздействует лишь в паузах.

Полученные результаты подтвердили выводы, сделанные при разработке советского компандера. Подтверждено, что предельно компандированный речевой сигнал при постоянных времени управления компрессора от 0,6 до 6 мс не отличается по звучанию от естественного, причем при постоянных времени управления, не превышающих 6 мс, не требуется компенсация задержки. Показано, что огибающую при передаче можно дополнительно сглаживать цепью первого порядка с постоянной времени до 20 мс, не ухудшая качества звучания.

Установлено, что выигрыш в отношении сигнал/шум в канале с управляемым компандированием речи по сравнению с естественной при равенстве средних мощностей составляет не менее 14 дБ и подтверждено, что компандированная речь малочувствительна к воздействию шумов на огибающую.

Полный радиотелефонный канал реализован [63] в аппаратуре речевого канала (АРКА).

Структурная схема радиотелефонной линии связи в общем виде представляет собой дуплексный канал связи, сопрягаемый с каналами ТЧ телефонной сети связи (рис. 2.13). Процесс установления связи между абонентами телефонной сети пунктов А и Б происходит поэтапно. Радисты-операторы пунктов А и Б с помощью радиопроводного переходного устройства (РППУ) *1* и *2* и радиосредств (передатчиков *3* и *4*, приемников *5* и *6*) устанавли-

вают между собой связь по радиоканалу (при необходимости они используют для этого радиокомпандеры *7* и *8*). Затем радисты-

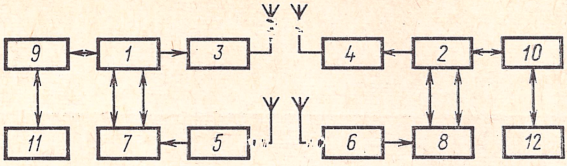


Рис. 2.13. Структурная схема радиотелефонного канала

операторы с помощью устройств *1* и *2* связываются с телефонистами коммутаторов телефонных станций *9* и *10*, а если коммутаторы *9* и *10* автоматические, то непосредственно с абонентами телефонной сети *11* и *12*. Затем они подключают абонентов к радиоканалам. С этого момента между абонентами пунктов А и Б связь считается установленной.

Рассмотренная линия связи является обслуживаемой. Очевидно, что после организации прямого и обратного радиоканалов и подключения их к автоматическим коммутаторам телефонных станций абоненты сами смогут связываться между собой, если предусмотрена возможность передачи по радиоканалу необходимых служебных сигналов: вызова станции, набора номера, занятости линии абонента, отбоя и т. п. В этом случае радиотелефонный канал становится частью автоматизированной сети связи и существенно повышаются требования к помехозащищенности передаваемых сигналов, особенно служебных.

Таким образом, РППУ функционально обеспечивает сопряжение радиоканала и телефонной линии связи, контроль и управление ими.

Структурная схема РППУ дана на рис. 2.14. В ее состав входят дифференциальная система *1* для сопряжения дуплексного радиоканала с абонентской линией или подключения переговорного устройства блока служебной связи к трактам передачи и приема; блок служебной связи *2* для ведения служебных переговоров, передачи служебных сигналов через передатчики тонального вызова *3* и вызова постоянным током *4;* приемники вызова постоянным током *5* и тонального вызова *6*; блок слухового контроля *7* для прослушивания речевых сигналов в трактах передачи и приема; блок обратной работы *8* для коммутации выхода приемника на вход передатчика или выхода тракта приема радиокомпандера на вход его тракта передачи (необходимость таких режимов работы возникает при проверке работоспособности радиоканала или при ретрансляции); блок обхода *9* для подключения трактов передачи и приема РППУ непосредственно к радиоканалу.

В РППУ входят также индикаторное табло, на котором отображается информация о различных служебных сигналах, и измери-

тельный индикатор, осуществляющий контроль параметров входных и выходных речевых сигналов и режимов работы различных функциональных блоков и блока питания.

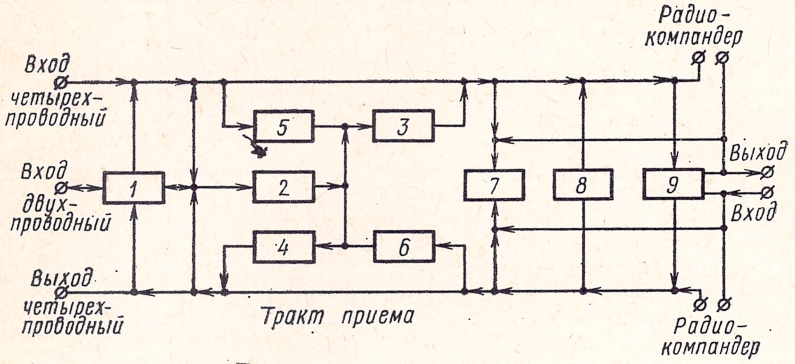


Рис. 2.14. Структурная схема радиопроводного переходного устройства

Из рассмотрения РППУ и его основных функций следует, что оно должно входить в оконечную аппаратуру радиотелефонного канала при любом типе устройства преобразования речевых сигналов, например вокодере, радиокомпандере и т. п.

Полный набор устройств радиотелефонного канала входит в состав аппаратуры АРКА, разработанной НИИрадио совместно с Одесским филиалом ЦКБ и Одесским заводом «Промсвязь» Министерства связи СССР [97].

Основой аппаратуры является радиокомпандер, соответствующий Рекомендации МККР № 455. Функциональная схема радиокомпандера АРКА представлена на рис. 2.15.

Речевой сигнал от РППУ подводится ко входному усилителю и фильтру 0,3—3,4 кГц (*Уф 3, 4*). С выхода *Уф 3, 4* сигнал в канале управления поступает на компрессор K_1, где динамический диапазон входного речевого сигнала сжимается в два раза. Амплитудным детектором выделяется огибающая речевого сигнала, причем постоянная времени детектора выбрана так, что в K_1 происходит слоговая компрессия. С выхода предварительного усилителя K_1 сигнал поступает на вход речевого канала и через линию задержки $ЛЗ_1$ — на вход двух последовательно включенных компрессоров K_{2-1} и K_{2-2}. Линия задержки $ЛЗ_1$ осуществляет временно́е согласование речевого сигнала и сигнала огибающей с выхода амплитудного детектора K_1 на соответствующих входах K_{2-1} и K_{2-2}.

В K_{2-1} и K_{2-2} речевой сигнал сжимается до постоянного уровня и далее поступает на вход линии задержки $ЛЗ_2$. Задержанный компрессированный сигнал через фильтр 0—2,7 кГц (*Ф 2,7*) и оконечный усилитель (*ОУс*) подводится к РППУ. Одновременно ко второму входу *ОУс* подводится выходной *ЧМ* сигнал канала уп-

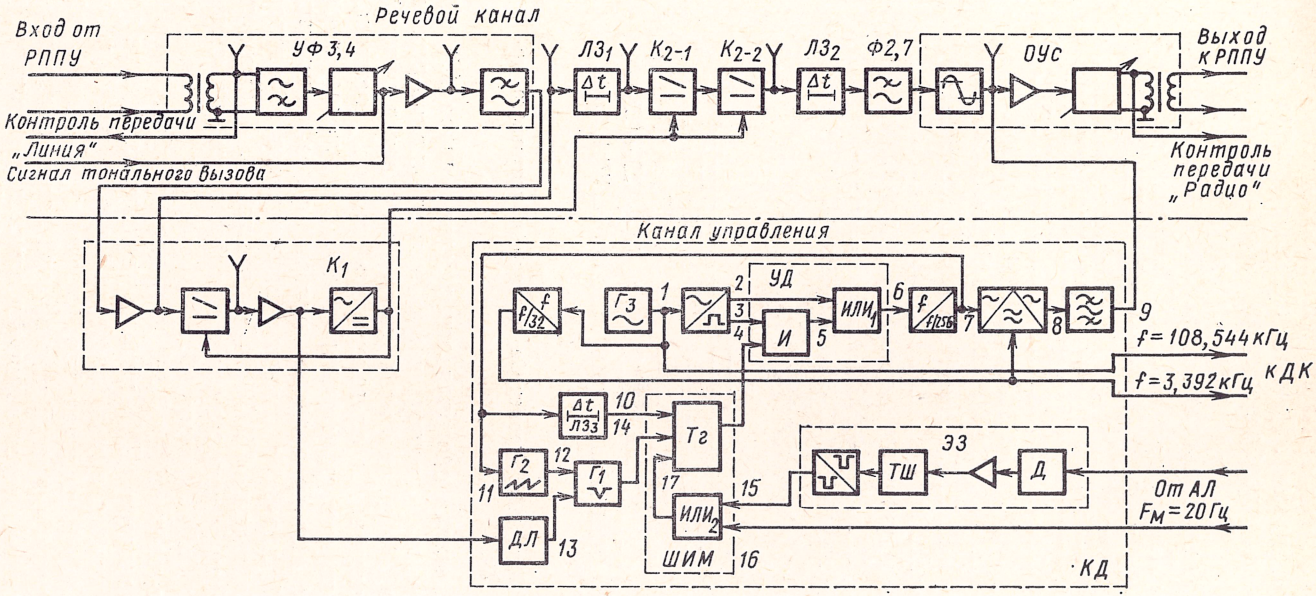


Рис. 2.15. Функциональная схема радиокомпандера АРКА (передача)

равления с выхода кодера (КД). Временны́е диаграммы, поясняющие работу КД, показаны на рис. 2.16*а* (точки контроля отмечены на схеме цифрами). Речевой сигнал с выхода K_1 поступает на функциональный преобразователь *ДЛ* (детектор — логарифма-

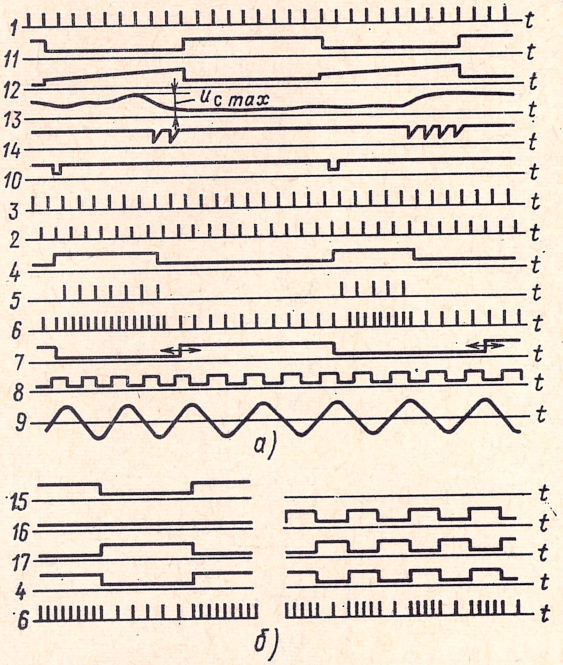


Рис. 2.16. Временна́я диаграмма частотного кодера

тор). С его выхода слоговая огибающая (эпюра *13*) подается на схему сравнения $Г_1$, выполненную в виде диодно-регенеративного компаратора. На другой вход схемы $Г_1$ подается пилообразное напряжение (эпюра *12*) от генератора пилы $Г_2$, запускаемого импульсами дискретизации (эпюра *11*). Импульсы дискретизации снимаются с выхода делителя частоты с коэффициентом деления $n=256$, возбуждаемого импульсами кварцевого генератора $Г_3$ с частотой следования 108,544 кГц (эпюра *1*). Кроме того, импульсы дискретизации используются для формирования сигнала управления узлом *ШИМ* (эпюра *10*).

Сигнал с частотой $f=3{,}392$ кГц для преобразователей частоты в КД и в декодере (ДК) канала управления тракта приема снимается с выхода делителя частоты с $n=32$. Сигнал на выходе *ШИМ* (эпюра *4*) начинает формироваться в момент, совпадающий с задним фронтом импульса с выхода линии задержки $ЛЗ_3$ (эпюра *10*), и прекращается в момент равенства амплитуд огибающей и пилообразного напряжения (эпюра *14*). Таким образом, сигнал на

выходе *ШИМ* представляет собой последовательность импульсов, следующих с частотой дискретизации и меняющихся по длительности от 18,5 мкс (при минимальном уровне речевого сигнала) до 765 мкс при его максимальном уровне. Эта последовательность импульсов (эпюра *4*) подводится ко входу схемы *И* узла добавления *УД*. На другой вход схемы *И* подается последовательность импульсов с выхода формирователя импульсов (эпюра *3*). В схеме $ИЛИ_1$ происходит сложение поступающих на нее импульсных последовательностей (эпюра *6*). С выхода *УД* импульсы поступают на делитель частоты, где формируется импульсная последовательность (эпюра *7*) с частотой следования, изменяющейся от 421 до 552 имп/с соответственно при минимальном и максимальном уровне речевого сигнала.

Кварцевый генератор, делитель частоты с $n=256$, узел *ШИМ* и узел добавления представляют собой схему дискретного модулятора. Модулированная по частоте импульсная последовательность преобразуется по частоте (эпюра *8*) и через фильтр подводится ко входу *ОУс* (эпюра *9*).

Таким образом, с выхода тракта передачи на РППУ поступают два сигнала: компрессированный речевой сигнал с полосой частот 0,3—2,7 кГц и модулированный по частоте сигнал канала управления с полосой 2,84—2,971 кГц. Следовательно, суммарный выходной сигнал радиокомпандера занимает полосу частот от 0,3 до 2,971 кГц.

В тракте приема (рис. 2.17) осуществляется обратное преобразование сигналов, т. е. в соответствии со значением частоты управляющего сигнала происходит экспандирование компрессированного речевого сигнала. От РППУ на вход тракта приема поступает от радиоприемника суммарный сигнал, подобный выходному сигналу тракта передачи. Во входном усилителе с фильтром *УФ 2,7* происходит разделение сигналов речевого канала и канала управления.

К выходу фильтра *Ф 2,7* подключен регулятор *ФР*, выполненный по схеме компрессора с прямым управлением. Компрессированный речевой сигнал через линию задержки $ЛЗ_3$ подводится к другим последовательно включенным экспандерам *Э*, управление которыми осуществляется с выхода антилогарифматора *АЛ*. На вход *АЛ* поступает детектированный сигнал канала управления, содержащий информацию об уровне переданного речевого сигнала. Экспандированный сигнал усиливается оконечным усилителем с фильтром *ВЧ* (*ОУс — Ф 0,3*) и поступает на РППУ.

В канале управления фильтром с полосой пропускания 2,81—2,88 кГц выделяется сигнал, который преобразуется по частоте с помощью опорного колебания, получаемого от КД. Далее этот сигнал декодируется в ДК, выполненном по схеме импульсного ЧМ дискриминатора интегрирующего типа.

Из модулированного по частоте колебания амплитудным ограничителем формируются прямоугольные импульсы, которые дифференцируются в F_3. Далее амплитудным детектором выделяются

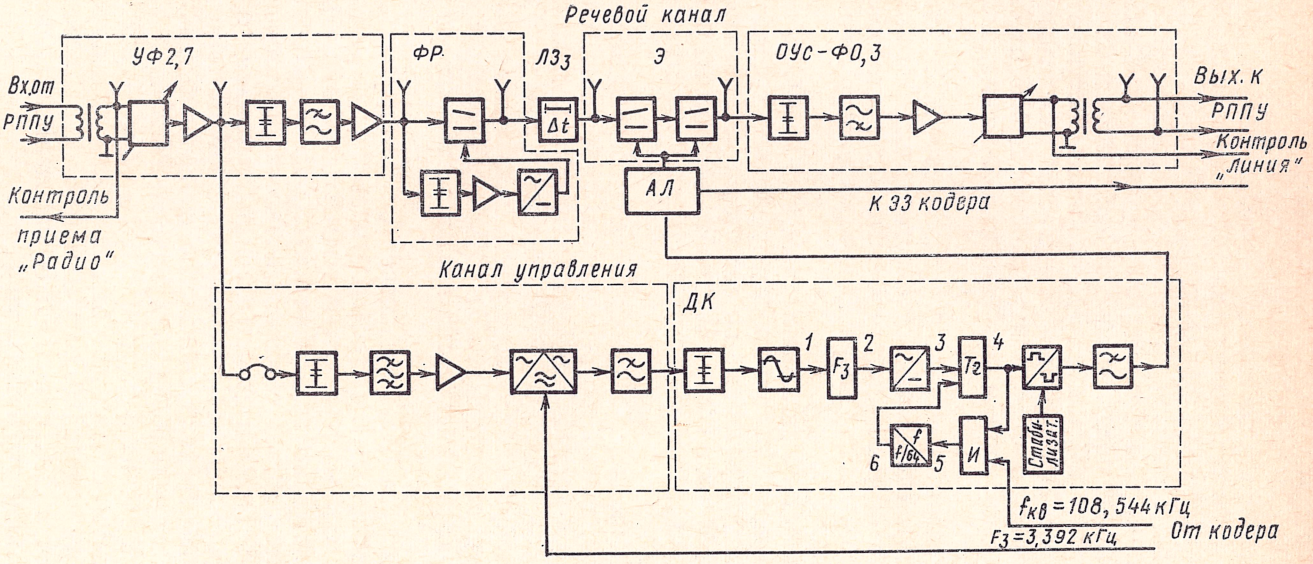


Рис. 2.17. Функциональная схема радиокомпандера АРКА (прием)

моменты переходов через нуль. Формирующий триггер *Тг*, делитель частоты с коэффициентом деления $n=64$ и схема *И* формируют калиброванные по длительности импульсы. Затем эти импульсы поступают на вход фильтра нижних частот. Постоянная составляющая напряжения, выделенная фильтром, пропорциональна частоте сигнала управления и соответственно логарифму огибающей исходного речевого сигнала. Далее эта постоянная составляющая поступает на вход *АЛ*.

С выхода *АЛ* сигнал, пропорциональный огибающей речи, подводится также к цепи эхо-заградителя (*Э*) (см. рис. 2.15). В *Э* сигнал интегрируется в блоке *Д*, усиливается и поступает на вход реактивного триггера *ТШ*, время удержания которого больше длительности самого длинного слога. Выходной сигнал *ТШ* через формирователь импульсов и схему *ИЛИ* узла *ШИМ* воздействует на вход формирующего триггера *Тг* (рис. 2.16*б*, эпюры *15, 16, 17*). При этом на выходе канала управления появляется сигнал, частота которого соответствует минимальному уровню речевого сигнала, что приводит к запиранию экспандера в тракте приема на другом конце радиолинии. Таким образом, предотвращается самовозбуждение в радиотелефонном канале связи.

На рис. 2.16*б* приведены временны́е диаграммы (*15*, *16*, *17*, *4* и *6*), поясняющие принцип работы цепи *ЭЗ*. Там же (справа) даны временны́е диаграммы, соответствующие передаче сигнала тонального вызова в радиокомпандере. В этом случае в речевом канале передается непрерывный сигнал с частотой 500/1000 Гц, а в канале управления — манипулирующий сигнал с частотой $f=20$ Гц. Такой принцип передачи обеспечивает большую помехозащищенность тонального вызова.

Аппаратура радиотелефонного канала выполнена [63] в виде стойки, в которой размещены два комплекта, что обеспечивает загрузку обеих боковых ОБП передатчика. Двухканальное выполнение аппаратуры позволяет использовать ее также и в качестве ретранслятора. В этом случае в пункте ретрансляции осуществляется переприем сигналов звукового управляющего подканалов и, кроме того, радист-оператор может вести эффективный контроль работы радиолинии, а при необходимости организовать служебную связь с любым из оконечных пунктов канала связи.

В трактах передачи и приема речевого канала использовались однотипные функциональные узлы, например усилители, фильтры, делители частоты, линии задержки и т. п. Канал управления целиком построен на элементах дискретной техники, а в качестве задающего генератора в КД и для получения опорных частот для преобразователей частоты используется кварцевый генератор. Такое выполнение канала управления позволяет обойтись без органов оперативной подстройки при сохранении высокой стабильности частоты управляющего сигнала.

Оконечная аппаратура радиотелефонного канала была испытана на экспериментальных и коммерческих КВ радиолиниях протяженностью 2800 км северо-восточного и 2200 км юго-западного

направления. Длительные испытания показали более высокое качество речевых сигналов и их большую помехозащищенность в радиолинии при работе с радиокомпандером по сравнению с обычным однополосным радиотелефоном. Аппаратура АРКА обеспечивала сопряжение радиоканала не только с абонентской телефонной сетью данного пункта, но и через междугородную телефонную станцию с сетями других городов.

Для оценки разборчивости речи проводились артикуляционные измерения в соответствии с ГОСТ 7153—68. Сеансы работы с аппаратурой АРКА и без нее чередовались. В этих условиях даже в присутствии станционных помех слоговая разборчивость при включении аппаратуры АРКА возрастала от 46—56 до 61—78% соответственно.

При выключении из речевых каналов согласующих линий задержек слоговая разборчивость (при работе аппаратуры на себя) уменьшалась от 80 до 79%.

Таким образом, оконечная аппаратура радиотелефонного канала должна иметь в своем составе РППУ и радиокомпандер, конструктивно выполняться в виде рабочего места радиста-оператора (рис. 2.18).

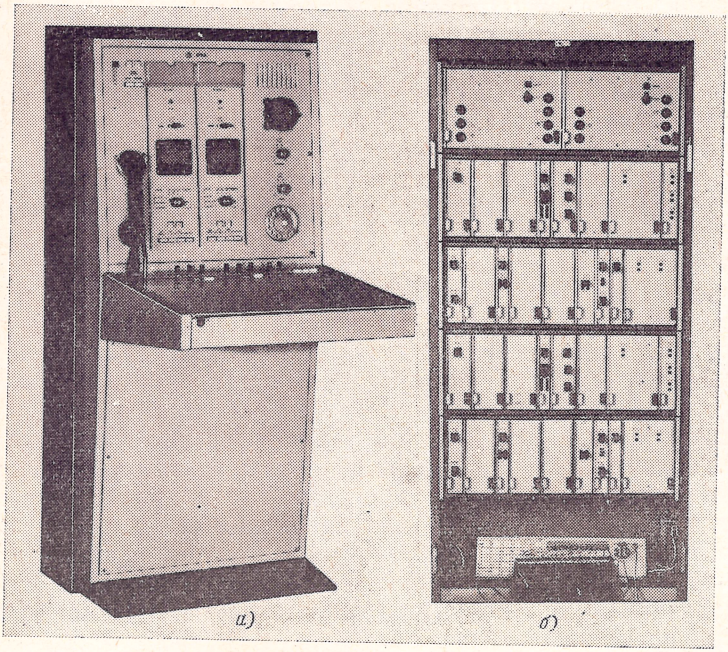


Рис. 2.18. Общий вид радиокомпандера АРКА:
а — вид спереди; *б* — вид сзади

Выполнение аппаратуры в двухканальном варианте позволяет загружать обе боковые однополосного передатчика, использовать аппаратуру в качестве ретранслятора и резерва.

Применение дискретных элементов позволяет выполнить аппаратуру со стабильными характеристиками, без органов оперативной подстройки. Подобная аппаратура может использоваться и на РРЛ, в каналах подачи программ вещания, в морской радиосвязи, в линиях связи по ЛЭП, в сетях телефонной связи с подвижными объектами и т. д.

В состав аппаратуры АРКА не входят устройства обеспечения негласности, однако предусмотрена возможность подключения стандартных устройств (инверторов спектра и полосовых шифраторов) в тех случаях, когда появляется такая необходимость.

Для повышения качества работы внутриобластных и внутрирайонных коротковолновых линий радиотелефонной связи, оснащенных однополосными маломощными радиостанциями РСО-30 и РСО-300 (30 Вт и 300 Вт соответственно), Куйбышевским отделением НИИР и Куйбышевским заводом «Промсвязь» разработан радиокомпандер ВЕТКА [64]. Аппаратура состоит из управляемого компандера, компенсатора нестабильности частоты радиостанции и панели управления (РППУ).

Наличие элементов компенсации нестабильности частоты радиостанции позволяет использовать относительно малостабильные радиосредства. Компандирование речевых сигналов в аппаратуре ВЕТКА производится на промежуточной частоте. Соответственно производится и обработка управляющих сигналов. Основные технические параметры радиокомпандера следующие: полоса рабочих частот 300—3400 Гц; динамический диапазон уровней речевого сигнала 45 дБ; уровень собственных шумов 50 дБ; коэффициент гармоник не более 5%.

Аппаратура сконструирована в виде настольного пульта оператора, обеспечивающего сопряжение радиолинии с проводным каналом АТС.

2.5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ КОМПАНДЕРОВ

Основной областью внедрения радиокомпандеров в СССР, как и в мировой практике, следует считать коротковолновые радиотелефонные системы связи. Это, однако, не означает, что радиокомпандеры не могут применяться в космических, радиорелейных и кабельных системах связи (особенно на энергетически напряженных или наиболее важных линиях связи). Стандартизация параметров радиокомпандера фиксированной и морской служб рекомендациями МККР расширяет возможности внедрения соответствующей аппаратуры в первую очередь на радиотелефонных каналах связи с зарубежными странами, на радиолиниях морской связи (пассажирский, торговый, промысловый флот), а также в каналах магистральной и зоновой радиосвязи.

Известно, что для качественной передачи речи требуется большая мощность радиопередатчика: это определяет основные технико-экономические показатели канала связи.

Ранее отмечалось, например, что если для уверенной передачи речевого сигнала минимального уровня в радиоканале требуется мощность 1 кВт, а диапазон передаваемых изменений речевых сигналов составляет 40 дБ, тогда при использовании линейного (однополосного) передатчика для передачи максимального сигнала необходима мощность 0,1 МВт. Даже при реализации таких связных передатчиков задача не решается, ибо из-за высокого отношения максимального значения мощности речи к ее среднему значению мощность линейного передатчика в течение основного времени работы значительно меньше своего номинала. Следовательно, применение метода компрессии динамического диапазона амплитуд речевого сигнала на 40 дБ позволило бы увеличить отношение сигнал/шум на входе приемника в 100 раз.

По сравнению с существующими радиотелефонными каналами связи, оборудованными радиопроводными переходными устройствами (РППУ), состоящими из дифференциальной системы и эхозаградителя, компандер типа АРКА сложнее, однако применение его позволяет: 1) повысить использование передатчика, что улучшает отношение сигнал/шум на входе приемника; 2) подавить шум в паузах, что существенно повышает разборчивость речи; 3) исключить «радиоакцент». Иными словами, по субъективным оценкам абонентов качество радиоканала приближается к качеству каналов ТЧ.

Итак, эффективность управляемого компандирования сигналов в радиосвязи определяется выигрышем в мощности передатчика [65]. Отмеченные преимущества количественно оцениваются выигрышем в отношении сигнал/шум при одинаковой артикуляции в тракте с включенным или выключенным радиокомпандером. Так, в области значений слоговой разборчивости 70—80% включение компандера обеспечивает получение выигрыша в 10 дБ, что эквивалентно десятикратному повышению мощности передатчика.

Для иллюстрации методики оценки экономического эффекта, получаемого в результате повышения эквивалентной мощности передатчиков, будем исходить из наличного парка передатчиков. Положим, что экономические показатели радиолинии изменяются при включении компандера так же, как при включении передатчика «Пурга» вместо передатчика «Молния», передатчика «Молния» вместо передатчика «Циклон», передатчика «Циклон» вместо передатчика «Снежинка».

Расходы на различные типы передатчиков приведены в табл. 2.12 [66].

Экономическая эффективность внедряемой аппаратуры подсчитывается по формуле $Э=(C_с+E_нK_с)-(C_н+E_нK_н)$, где $C_с$ и $C_н$ — себестоимость передатчиков на линии радиосвязи до и после внедрения компандера; $K_с$ и $K_н$ — удельные капитальные вложения на один передатчик до и после внедрения компандера; $E_н$ — норма-

тивный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений (0,12) [67].

ТАБЛИЦА 2.12

Тип передатчика	Капитальные затраты, тыс. руб.	Эксплуатационные расходы, тыс. руб,	Тип передатчика	Капитальные затраты, тыс. руб.	Эксплуатационные расходы, тыс. руб.
«Пурга»	466,3	58,7	«Циклон»	181	18,8
«Молния»	247,4	28,8	«Снежинка»	95,6	10,7

Капитальные затраты на комплект компандера составляют приблизительно 4000 руб, а с учетом монтажных работ (20% от стоимости) — 4800 руб. Годовые эксплуатационные расходы ориентировочно составляют 12% от капитальных затрат (по аналогии с соотношением эксплуатационных расходов и капитальных затрат по радиоприемным устройствам), т. е. 575 руб. Таким образом, к капитальным затратам и эксплуатационным расходам по обслуживанию передатчика прибавляются капитальные затраты и эксплуатационные расходы на компандер.

На одной радиотелефонной линии, оснащенной однополосными двухканальными передатчиками, включаются два передатчика и два комплекта радиокомпандера.

В табл. 2.13 представлены для примера результаты расчета экономической эффективности на второй год внедрения компандеров на 40 дуплексных радиолиниях, где предполагается заменить 80 различных передатчиков.

ТАБЛИЦА 2.13

Случай замены передатчиков	Годовой экономический эффект от замены одного передатчика, тыс. руб.	Число замененных передатчиков на второй год внедрения компандеров	Экономический эффект на второй год внедрения компандеров, тыс. руб.	
			годовой	суммарный
«Молния»— «Пурга»	53,825	6	322,95	1579,68
«Циклон»— «Молния»	16,725	34	569,65	
«Снежинка»— «Циклон»	17,177	40	687,08	

Рассмотренный вариант применения компандеров в радиосвязи не является единственным.

Второй вариант — внедрение телефонно-телеграфных модемов. Поскольку сигналы радиокомпандера занимают полосу частот 300—3000 Гц, а магистральный радиоканал имеет полосу 300—3400 Гц, то, разместив в полосе 3000—3400 Гц канал с фазовой манипуляцией для передачи сигналов от аппаратуры с автозапросом ошибок (200 Бод), двухканальный передатчик может обеспе-

чить передачу двух телефонных и восьми телеграфных (50 Бод) каналов.

Следовательно, экономическая эффективность внедрения совместной передачи телефонно-телеграфных сигналов равна стоимости радиолинии двойного частотного телеграфирования (ДЧТ) на передатчике «Циклон» при сравнимой мощности на один канал (примерно 100 тыс. руб). Для реализации этого варианта необходима разработка телеграфной приставки к радиокомпандеру.

Третий вариант — использование компандера для организации радиоканалов связи с переприемом. Разработка и внедрение радиокомпандера-ретранслятора позволят использовать на дальних широтных линиях радиосвязи южные пункты переприема радиотелефонных сигналов. Экономическая эффективность данного варианта определяется повышением надежности радиоканалов, т. е. увеличением времени их действия с заданным качеством (примерно на 10—15%). Кроме того, при размещении ретрансляторов на приемных центрах улучшается система эксплуатации и контроля радиоканалов.

Эффективность внедрения управляемых компандеров в радиовещании определяется выигрышем в эквивалентной мощности передатчика (возможностью снижения динамического диапазона транслируемых сигналов).

Оценка качества радиовещательных каналов связи весьма затруднительна ввиду резкого различия передаваемых сигналов (речь, музыка, пение, репортаж и т. д.). Однако общим свойством вещательных сигналов является наличие пауз. Поэтому для количественной оценки эффективности внедрения радиокомпандера в системах передачи программ вещания, в коротковолновых, радиорелейных, космических и кабельных системах связи применим критерий заметности шумов в паузе [65]. Действительно, при приеме радиовещательных передач в условиях наличия помех слушатель сильнее всего ощущает шум в паузе, поскольку при наличии звуковых сигналов (речь, музыка) они в определенной степени маскируют шумы и помехи.

Таким образом, способность той или иной системы связи обеспечить защиту паузы от зашумления можно принять за критерий эффективности этой системы. Следовательно, энергетический выигрыш от применения компандера в тракте передачи программы вещания можно приблизительно оценить по заметности помех (внятных и невнятных) в паузе.

Пусть, например, в радиовещательном канале шум в паузе прослушивается при отношении сигнал/помеха величины H. При включении в этот канал управляемого компандера шум в паузе может быть замечен слушателем лишь в случае искажения управляющего сигнала, ибо в остальное время приемный тракт (экспандер) заперт. Поскольку «шумовая» полоса управляющего канала в K раз меньше полосы звукового канала, мощность шумов в канале управления соответственно меньше: $H_у = H/K$. Следовательно, энергетический выигрыш B (по заметности шумов в па-

узе) от сужения полосы передачи сигнала паузы при включении управляемого компандера в тракт подачи программы вещания составляет $B=H/H_у=K$ раз.

Учитывая, что во время подачи паузы можно осуществить перераспределение мощности передатчика, сосредоточив ее только в канале управления, отметим, что мощность сигнала управления возрастает также в K раз. Таким образом, общий энергетический выигрыш (по критерию заметности шума в паузе) от включения компандера в тракт подачи программы вещания составляет $B=K^2$ раз.

Реальный энергетический выигрыш может быть меньше расчетного, поскольку шум в паузе может стать заметным при искажениях управляющего сигнала, приводящих к кратковременным отпираниям экспандера.

Таким образом, при включении радиокомпандера в коротковолновом или космическом тракте подачи программ вещания эквивалентная мощность передатчика возрастает более чем в 30 раз (при оценке по критерию заметности шума в паузе). Зная величину энергетического выигрыша, несложно рассчитать экономическую эффективность внедрения компандера в системах радиовещания (аналогично приведенному расчету для каналов радиосвязи).

Сказанное относится к коротковолновым и космическим каналам подачи вещательных программ, где могут использоваться отдельные радиопередатчики.

В случае передачи программ вещания по радиорелейным и кабельным системам включение управляемых компандеров позволяет снизить уровень сигналов на входе групповой аппаратуры, что, в свою очередь, позволит увеличить число высококачественных телефонных каналов.

Отметим, что в дальнейшем метод управляемого компандирования можно будет использовать не только для передачи программ вещания. Возможна совместимая система радиовещания, при которой радиоприем осуществляется как на обычные бытовые приемники, так и на приемники с экспандерной приставкой.

В заключение отметим, что особый интерес представляет применение систем с управляемым компандированием в ТЧ каналах для передачи данных. В этом случае можно организовать передачу данных в паузах речи.

Задача повышения пропускной способности каналов связи за счет использования пауз речи (до 70% времени занятия канала) достаточно сложна, однако ее решение упрощается с внедрением аппаратуры управляемого компандирования из-за наличия выделенного управляющего канала.

Таким образом, метод управляемого компандирования позволяет повысить не только помехоустойчивость, но и пропускную способность систем связи.

Расчеты экономической эффективности внедрения аппаратуры с управляемым компандированием в системах радиосвязи и радиовещания, основанные на оценке энергетического выигрыша, пока-

зывают, что прогрессивный метод передачи звуковых сигналов заслуживает большого внимания и дальнейшего изучения. Радиокомпандеры могут найти широкое применение в каналах дальней радиотелефонной связи как для фиксированных, так и для подвижных служб, причем «морская» модификация радиокомпандера может быть типовой и для сети низовой связи в фиксированных службах. Поэтому целесообразна разработка модификаций радиокомпандера для подачи программ вещания и передачи дискретных сигналов по коротковолновым, радиорелейным, космическим и кабельным линиям связи.

2.6. РЕКОМЕНДАЦИИ МККР В РАДИОТЕЛЕФОНИИ

С учетом вкладов разных государств (Англии, Франции, США, СССР, Японии) была принята Рекомендация № 455, которая детально регламентировала технические параметры и режимы работы радиокомпандера [68].

Рекомендация № 455 «Усовершенствованная система передачи для высокочастотных радиотелефонных линий» была принята на XIII Пленарной Ассамблее МККР в Женеве (Документ 3/1015 от 15.0.2.74).

Рекомендация № 455 гласит:

«МККР

учитывая,

a) что для сохранения удовлетворительного стандарта на международные радиотелефонные цепи, действующие на частотах ниже 30 мГц и соединенные с национальной сетью, необходимо компенсировать на передающем конце большинство, если не все изменения громкости речи абонентов и потери между абонентом и оконечной международной станцией;

b) что в результате цепь часто действует при условиях общего усиления (двухпроводная до двухпроводной) и необходимо использовать заградитель от обратной связи для сохранения стабильности;

c) что подавитель от обратной связи заметно ухудшает качество работы цепи из-за переключения и тенденции к нарушению работы, возникающей в результате шума и помех на радиолинии;

d) что использование подавителя от обратной связи для сохранения общей стабильности радиотелефонного канала препятствует соединению на четырехпроводной основе (см. Рекомендацию С101 МККТТ) радиоцепей с кабельными линиями большой протяженности или со спутниковыми линиями;

e) что, если бы радиотелефонные цепи эксплуатировались в соответствии с принятыми в настоящее время принципами потерь передачи порядка 7 дБ между двухпроводными точками, то их можно было бы включить в международную цепь;

f) что для сохранения постоянных общих потерь при обеспечении изменения громкости речи абонента и потерь в линии необходимо внести на приемном конце цепи затухание, эквивалентное усилению, вносимому на передающем конце;

g) что имеются преимущества работы компандера, используемого на некоторых проводных передающих системах, но нельзя их полностью реализовать на линии радиосвязи, подверженной замиранию;

h) что на такой радиолинии для контроля экспандера необходимы другие средства передачи информации о состоянии компрессора;

i) что эти средства позволяют получить выгоду от компрессии выше сжатия, используемого на линейных компандерах, которое обычно составляет 2/1;

j) что при таком устройстве оба конца цепи будут дополнительными и необходимо, чтобы были стандартизированы важные параметры системы;

k) что были установлены преимущества системы, использующие соединенные компрессор и экспандер (см. Проект Отчета С. *t* (III);

l) что такими устройствами должны быть укомплектованы оба конца линии и что основные параметры должны быть стандартизованы (сравнить с *j*).

Рекомендует:

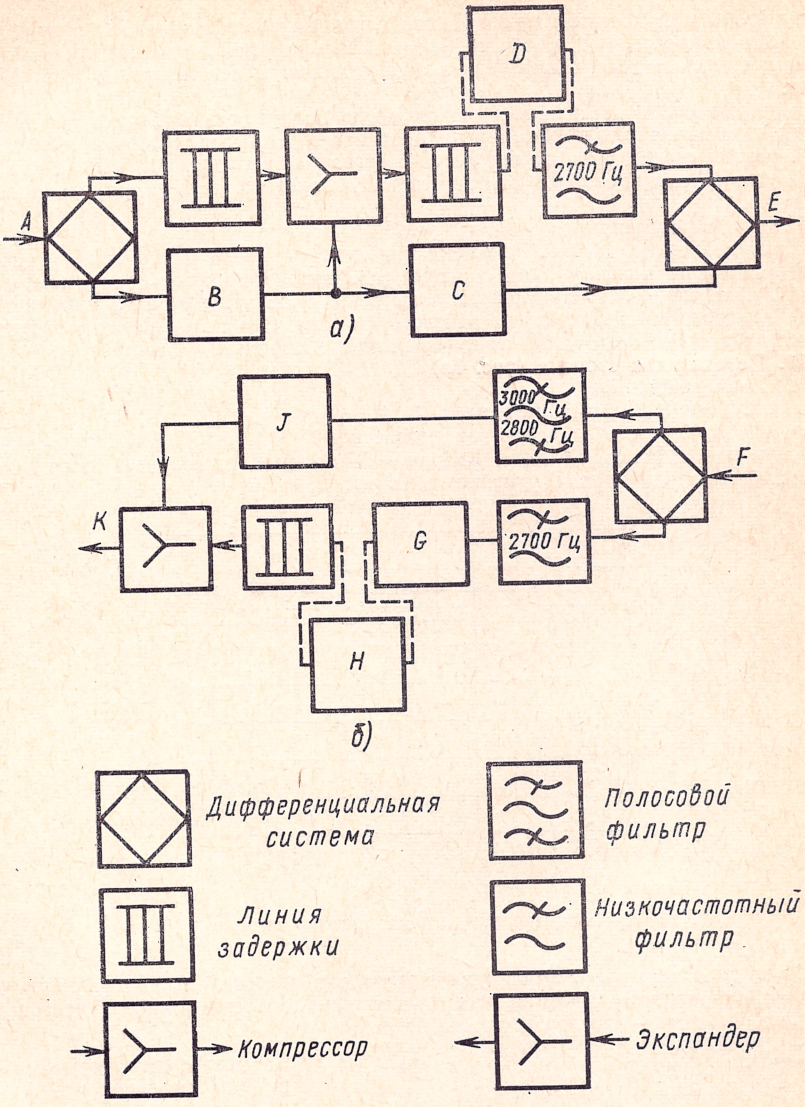


Рис. 1. Структурная схема радиокомпандера МККР:
A — входящая линия; *B* — амплитудный детектор; *C* — частотный модулятор; *D* — устройство негласности; *E* — к радиопередатчику; *F* — от радиоприемника; *G* — регулятор замираний; *H* — устройство негласности; *J* — частотный детектор; *K* — исходящая линия

1) чтобы во всех случаях, когда это возможно, ВЧ радиотелефонные линии эксплуатировались на основе постоянных общих потерь передачи (проводная к проводной);

2) чтобы для достижения такой характеристики использовалась система, содержащая компрессор и экспандер, соединенные контрольным каналом, который выделен в полосе телефонного сигнала и устойчив к искажению за счет замирания;

3) чтобы система сохраняла оптимальную нагрузку передатчика всегда, несмотря на изменения громкости речи абонента и разброса потерь в линии;

4) чтобы сигнал речи и контрольный сигнал находились в канале 3 кГц;

5) чтобы такая система соответствовала описанию и параметрам, описанным ниже:

5.1. Общие сведения

Для удобства в данной Рекомендации считается, что требования к работе основываются на конфигурации системы (где основные блоки представлены на рис. 1), которая на передающей стороне использует задержку до компрессора вместе с измерителем амплитуды речевого сигнала. Это не препятствует другим конфигурациям, которые удовлетворяют этим требованиям.

5.2. Передающая сторона (рис. 1*а*)

5.2.1. Речевой канал

5.2.1.1. Установившиеся условия
(компрессия и общие характеристики)

Для входных уровней от +5 дБм0 до —55 дБм0 (Примечание 1) выход должен находиться в пределах, указанных на рис. 2.

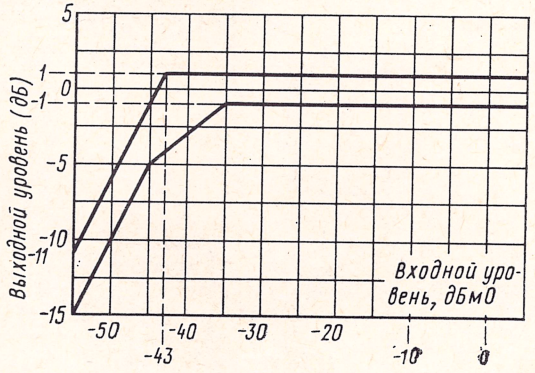


Рис. 2. Амплитудная характеристика передачи

Общая характеристика амплитуда/частота для речевого канала как при условиях фиксированного усиления, так и изменения амплитуды на любом уровне в пределах +5 дБм0 — 55 дБм0 должна быть:

Выше 250 Гц	Затухание относительно максимальной характеристики, дБ
Для частот в полосе 250—2500 Гц . . .	$\leqslant 2$
Для частот в полосе 2500—2700 Гц . .	$\leqslant 6$
Для частот в полосе 2800 Гц	$\geqslant 55$
Ниже 250 Гц	
общее усиление в полосе	$\leqslant 1$

5.2.1.2. Переходная характеристика
(общая, включая измерение амплитуды)

Время нарастания, рис. 3*а* (Примечание 2) (мс)	7±2
Время восстановления, рис. 3*b* (Примечание 2 (мс)	20±5

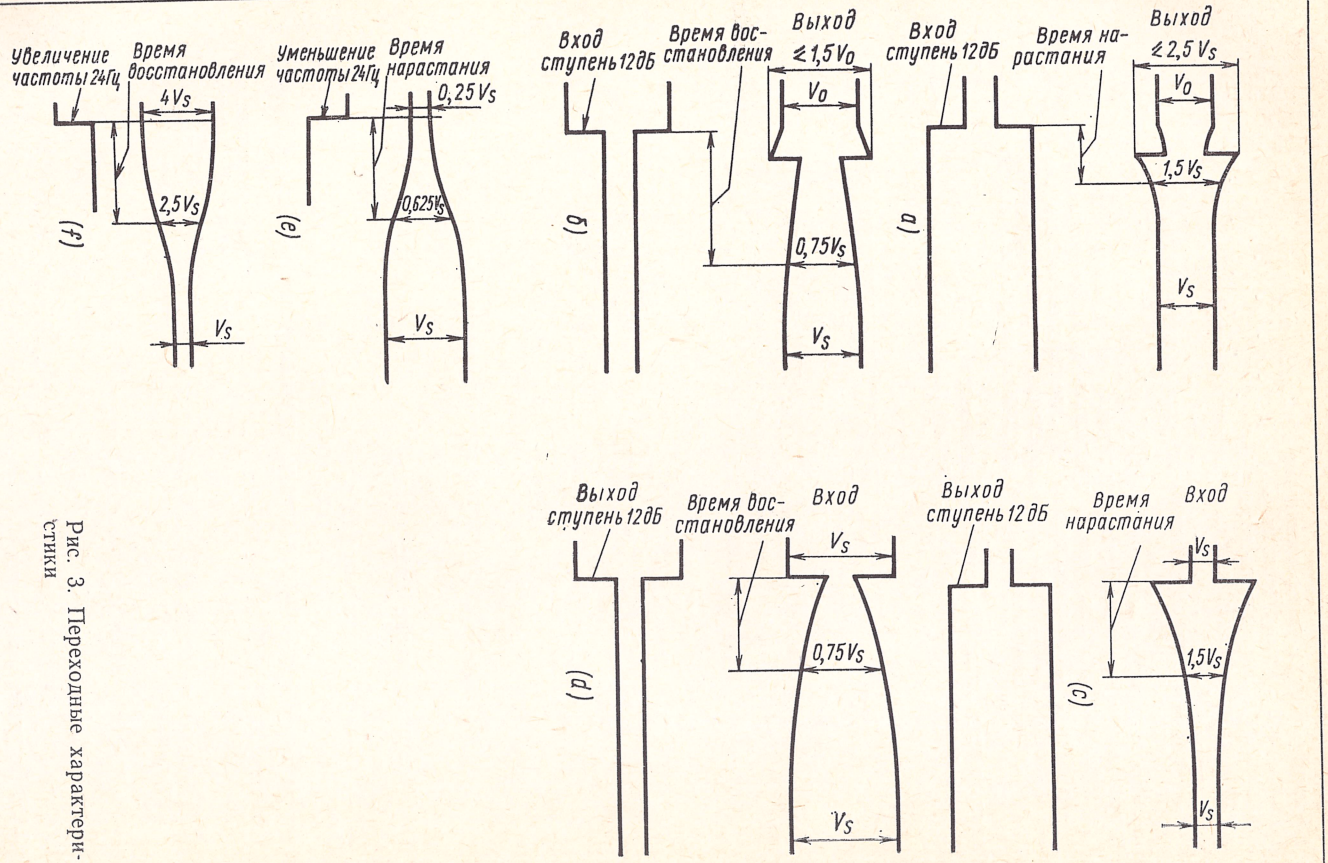


Рис. 3. Переходные характеристики

5.2.2. Контрольный канал

Частота, регулируемая выходным сигналом измерителя амплитуды:

Номинальная средняя частота (Гц) . . . . . 2900±1

Максимальная девиация частоты (Гц) . . . . . ±60

Изменение частоты для каждого изменения входного уровня на 1 дБ (рис. 4) (Гц) 2

Входной уровень на передающей стороне для получения номинальной средней частоты (дБм0) . . . . . —25

Частота генератора при входном уровне 0 дБм0 (Гц) . . . 2850

Частота генератора при отсутствии сигнала на передаче (Гц) . ⩽2980

Для внезапных скачков уровня, превышающих 3 дБ, время, необходимое для изменения частоты на 80%, должно составлять (мс) 5—7

Для внезапных уменьшений уровня, превышающих 3 дБ, скорость изменения частоты генератора должна находиться между (Гц/мс) . . . . . 1,5—3,5

Спектр выходных эффективно ограничивается до (Гц) . . .2810—2990

Уровень выхода относительно речевого канала (дБ) . . . —5

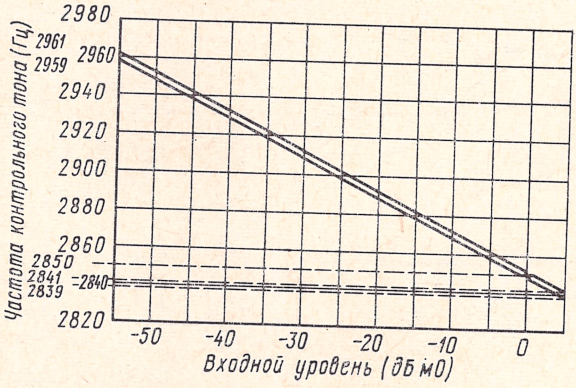


Рис. 4. Модуляционная характеристика передачи

5.3. Приемная сторона (рис. 1.*b*)

5.3.1. Речевой канал

5.3.1.1. Установившиеся условия

Относительная общая амплитудно-частотная характеристика речевого канала при условиях фиксированного и контролируемого усиления должна быть:

	Затухание относительно максимальной характеристики, дБ
Выше 250 Гц	
Для частот в полосе 250—2500 Гц . . .	⩽2
Для частот в полосе 2500—2700 Гц . .	⩽6
Для частот в полосе 2800 Гц и выше (регулятор замирания при фиксированном усилении)	⩾55
Ниже 250 Гц общее усиление	⩽1

5.3.1.2. Регулятор замирания

Установившиеся условия

— Для уровней входа между +7 дБм0 и —35 дБм0 выход должен находиться в пределах, указанных на рис. 5.

Номинальный выходной уровень прибора, который может изменяться Администрациями — это величина, измеренная на входе при условиях, когда уровень 0 дБм0 поддерживается на входе передающей стороны.

Переходная характеристика

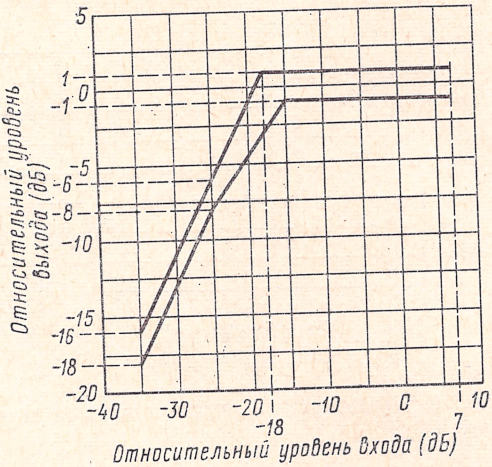


Рис. 5. Амплитудная характеристика регулятора замираний

— Время нарастания (рис. 3c) (мс) . . . . . 11±2
— Время восстановления (рис. 3d) (мс) . . . . . 32±6

5.3.1.3. Экспандер
(управляемый с выхода дискриминатора)

Эффективный диапазон (дБ) 60

5.3.2. Контрольный канал.

5.3.2.1. Характеристики амплитуда/частота и дифференциальной задержки фильтра

Затухание в полосе 2810—2990 Гц (относительно затухания на частоте 2900 Гц) (дБ) . . . . . —1 до +2
Дифференциальная задержка в полосе 2840—2900 Гц (мс) . . . ⩽3
Затухание ниже 2700 и выше 3150 Гц (относительно затухания на частоте 2900 Гц) (дБ) . . . . . ⩾55

5.3.2.2. Дискриминатор (преобразователь частота/амплитуда), характеристика на номинальном уровне контрольного тона.

Изменения выхода экспандера с изменениями частоты контрольного тона между 2840 Гц и 2960 Гц должны находиться в пределах, указанных на рис. 6.

5.3.2.3. Диапазон амплитуды дискриминатора

Характеристика, указанная в 5.3.2.2, должна удовлетворять уровням входного сигнала контрольного тона от 0 дБ до —30 дБ относительно номинального уровня входа.

При уровнях входного сигнала контрольного тона между —30 дБ и —50 дБ относительно номинального к пределам, показанным на рис. 6, можно добавить дополнительное ±1 дБ.

5.3.3. Общее время нарастания и восстановления

(Внезапное изменение на 24 Гц частоты контрольного тона использовалось для имитации ступени 12 дБ.)

Время нарастания (рис. 3*g*) (мс) . . . . . 20±5
Время восстановления (рис. 3*f*) (мс) . . . . . 20±5

5.4. Компенсация (общего) времени передачи

Чтобы обеспечить соответствующий стандарт на передачу в особенности для тональных импульсов, таких как импульсы, которые будут использоваться для посылки вызова или сигнализации, общее время передачи речевого и контроль-

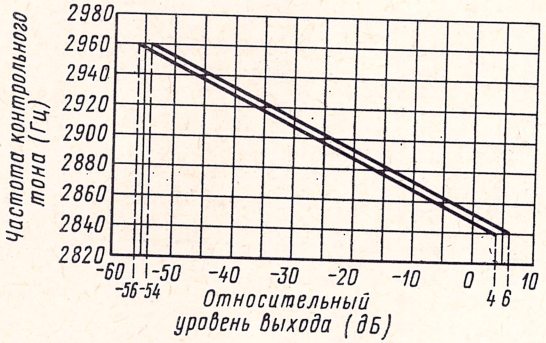


Рис. 6. Характеристика частотного демодулятора

ного каналов следует компенсировать на входе экспандера в пределах 4 мс. Кроме того, дифференциальная задержка в пределах участка полосы пропускания речевого канала, то есть 250 Гц — 2500 Гц, не должна превышать 4 мс.

Для того чтобы обеспечить достижение этого с помощью различных конструкций оборудования, компенсацию времени следует одинаково делить между передающей и приемной сторонами аппаратуры, а аппаратуру следует настроить так, чтобы можно было учитывать задержку времени, возникающую в системах обеспечения негласности.

5.5. Вызов и набор

Необходимо гарантировать, чтобы сигналы вызова и номеронабирателя проходили через оборудование в обоих направлениях или полностью обходили данную аппаратуру. Первый метод предпочтительнее.

5.6. Загрузка передатчика

Для того чтобы передатчики были полностью загружены при условии поддержания на приемном уровне продуктов интермодуляции и внеполосных излучений уровни речевого и управляющего сигналов в каждом телефонном канале передатчика должны устанавливаться в соответствии с табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

Число каналов	Мощность канала в дБ относительно пиковой мощности огибающей		Число каналов	Мощность канала в дБ относительно пиковой мощности огибающей	
	звуковой подканал	подканал управления		звуковой подканал	подканал управления
1	—7	—12	3*	—12	—17
2	—10	—15	4	—13	—18

*) Для оперативности допустимо использование тех же уровней мощности для трех каналов, какие рекомендуются для четырех.

Рекомендованные данные обеспечивают величину средней выходной мощности — 6 дБ относительно пиковой мощности передатчиков и мощности несущей — 20 дБ относительно пиковой.

5.7. Линейность тракта передачи

Вышеизложенные условия загрузки обеспечивают достаточные резервы в радиопередатчике, чтобы допустить нормированные нелинейности в аппаратуре «Линкомпекс» и соединительной линии к передатчику.

Принимая во внимание, что выходной сигнал системы «Линкомпекс» имеет отношение пиковой мощности к средней около 8 дБ (с учетом пиков переходных процессов на выходе компрессора), соответствующие пределы линейности должны быть обеспечены в тракте между выходом системы «Линкомпекс» и радиопередатчиком. Аналогичны требования к тракту между выходом радиоприемника и входами приемного полукомплекта «Линкомпекс». Современные радиоприемники обеспечивают выполнение указанных требований, но нужно следить за установкой уровней, чтобы поддерживать необходимую линейность.

5.8. Стабильность частоты

Максимальная нестабильность в радиоканале, по которому должна работать система «Линкомпекс», не должна превышать ±2 Гц.

Примечание 1. Для определения отношения уровня сигнала к испытательному (дБм0) (см. соответствующие документы МККТТ).

Примечание 2. Ниже приведены следующие определения времени нарастания и времени восстановления, аналогичные времени нарастания и времени восстановления, определенном МККТТ для компандеров (Рекомендация G. 162):

Время восстановления компрессора определяется как время между моментом, когда начинается внезапное уменьшение на 12 дБ выхода, и моментом, когда огибающая выходного напряжения в 0,75 раз больше своей постоянной величины.

Время нарастания компандера определяется как время между моментом, когда происходит внезапное увеличение на 12 дБ входа, и моментом, когда огибающая входного напряжения достигает величины в 1,5 раза больше своей постоянной величины.

Примечание 3. Перечисленные выше параметры считаются минимальными, которые следует согласовать, если необходимо обеспечить совместимость аппаратуры. Кроме того, определены дополнительные максимальные допуски и предполагалось, что эти допуски будут использоваться как конструктивные пределы.

Примечание 4. Характеристики температуры и источников энергии, при которых должны сохраняться рекомендованные параметры, могут изменяться Администрациями, и поэтому они не нормированы МККТТ, однако в спецификации для компандеров (Рекомендация G. 162) указано, что характеристики следует сохранять в пределах температурного диапазона от +10° С до +40° С и при изменениях источника энергии ±5% от номинальной величины.

Примечание 5. Дополнительные параметры, которые обычно включаются в спецификацию для этого класса аппаратуры, т. е. входной и выходной импедансы и уровни, отношение сигнал/шум, нелинейности и т. д., не были включены, поскольку их величина не считается существенной для совместимости аппаратуры. Администрации вправе добавить свои величины с целью обеспечения удовлетворительного введения аппаратуры в свои сети.

Примечание 6. Тип передачи в канале управления, согласно данной рекомендации, не следует рассматривать как класс F3; следовательно, ограничение радиорегламента на применение сигналов класса F3 в фиксированных службах в диапазоне до 30 мГц не может применяться».

Единогласное принятие Рекомендации № 455 [68] иллюстрирует пример решения важной технической задачи общими усилиями специалистов разных стран, объединенных в МККР для сотрудничества в интересах всего человечества.

3

Способы повышения эффективности систем с компандированием

3.1. ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕЛЕФОННОГО КАНАЛА

Повышение помехоустойчивости современного радиотелефонного канала определяется, по крайней мере, тремя основными факторами: повышением помехоустойчивости радиоприема, что обеспечивает лучшее качество речи и достигается применением радиокомпандера; повышением помехоустойчивости эхо-заградителя, что обеспечивает уменьшение частости ложных переключений и достигается управлением по узкополосному подканалу радиокомпандера; повышением помехоустойчивости радиоприема вызывных сигналов, что обеспечивает снижение частости ложного вызова и частости потери вызова и достигается передачей вызывных сигналов по узкополосному подканалу радиокомпандера.

Рассмотрим подробнее новые возможности повышения качества радиосвязи, которые реализуются с внедрением радиокомпандера.

Во-первых, помехоустойчивость радиоканала фактически определяется качеством передачи управляющего сигнала и поэтому повышение его помехоустойчивости весьма важно. Хотя шумовая полоса канала управления существенно меньше полосы звукового канала, помехи и многолучевость могут повредить управляющий сигнал, а следовательно, нарушить точность восстановления огибающей речи и исказить звуковой сигнал. Естественно, чем больше передаваемый уровень управляющего сигнала, тем выше помехоустойчивость радиотелефонного тракта. Помехоустойчивость подканала управления может быть повышена путем увеличения его мощности (уровня) в паузах между звуковыми сигналами. Повышение помехоустойчивости в паузах речи необходимо в связи с тем, что шумы канала связи наиболее ощутимы слушателями именно в паузах, ибо во время прослушивания сигналов шум маскируется самим звуковым сигналом. Кроме того, в паузах речи компрессор может усиливать шумы абонентской линии и, таким образом, мощность звукового подканала не используется для передачи информации, причем время действия пауз в телефонии достигает 70%. Между тем в радиокомпандерах возможно перераспределять мощность между звуковым и управляющим подканалами так, чтобы в паузах речи передавался только управляющий сигнал, причем полной мощностью радиопередатчика. Особенностью перераспределения мощностей в подканалах радиотелефонного компандера является наличие эхо-заградителя, который регулирует направление передачи речевых сигналов в дуплексной радиолинии и поз-

воляет одновременно изменять уровни передаваемых сигналов. (Напомним, что в соответствии с Рекомендацией № 455 уровень управляющего сигнала должен поддерживаться постоянным и быть на 5 дБ ниже уровня выходных звуковых сигналов). Перераспределение мощности радиопередатчика в паузах, обеспечивая повышение помехоустойчивости радиосвязи, не исключает сопряжения с аппаратурой, выполненной по Рекомендации № 455, так как производится на оконечной станции радиотракта. Структурная схема передатчика радиокомпандера с автоматическим перераспределением уровней показана на рис. 3.1, где звуковой канал *1*

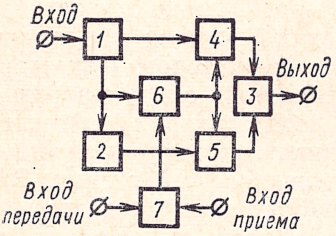


Рис. 3.1. Структурная схема передатчика радиокомпандера с регуляторами уровней

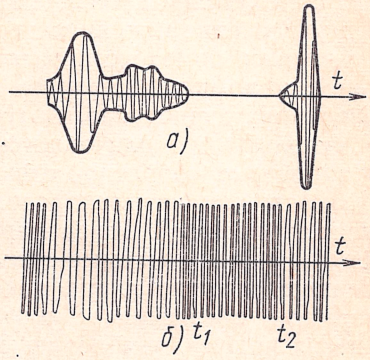


Рис. 3.2. Временна́я диаграмма работы с распределением уровней

и управляющий канал *2* подключены к выходному линейному сумматору *3* через регуляторы уровней *4* и *5* соответственно. Управляющие выходы инверсных регуляторов *4* и *5* подключены через сумматор регулирующих сигналов *6* к выходу эхо-заградителя *7* и выходу детектора огибающей звукового канала *1*.

Во время работы на передачу уровни звукового и управляющего каналов соответствуют Рекомендации № 455 при наличии речевых сигналов, превышающих определенный уровень, фиксируемый пороговым элементом, входящим в состав блока *6*. Во время пауз между звуками уровень управляющего сигнала повышается, а уровень шумового сигнала в звуковом тракте подавляется.

Во время работы на прием регулирующий сигнал поступает на блок *6* с эхо-заградителем *7* и в этом случае на радиопередатчик транслируется только управляющий сигнал, уровень которого соответствует полной загрузке (регулятор *4* уменьшает, а регулятор *5* увеличивает уровень до максимума).

Следует подчеркнуть, что регулировка выходных уровней в подканалах радиокомпандера предпочтительней введения управляющего сигнала в тракт компрессора [57], так как в последнем случае пришлось бы суммировать управляющие сигналы, прошедшие разными путями, что чревато дополнительными искажениями, воз-

никающими из-за неидентичности трактов. Временна́я диаграмма (рис. 3.2) иллюстрирует форму входных (*а*) и выходных (*б*) сигналов радиокомпандера. Из диаграммы следует, что управляющий сигнал может передаваться максимальным уровнем всегда, кроме времени существования звуковых сигналов, т. е. во время слоговых пауз ($t_1 - t_2$) и во время пауз в речи (время работы «на прием»). Итак, перераспределение выходных уровней в подканалах радиокомпандера позволяет увеличить помехоустойчивость радиоприема управляющего сигнала в паузах речи, эквивалентную почти десятикратному увеличению мощности. (Обычно напряжение управляющего сигнала вдвое меньше звукового и, следовательно, достигается увеличение напряжения управления втрое).

Во-вторых, помехоустойчивость радиотелефонного канала с управляемым компандированием может быть повышена путем использования узкополосного эхо-заградителя. Обычно эхо-заградители используются для защиты от самовозбуждения радиолинии (для защиты от «обратной связи»), опасность которого существует при сопряжении четырехпроводной радиолинии с двухпроводной абонентской линией. Из-за разбаланса сопрягающих элементов (дифсистем) принимаемые сигналы проникают в тракт передачи и, усилившись компрессором, искажают передаваемый сигнал. Эхо-заградитель обеспечивает поочередно работу тракта «на передачу» и «на прием», чем исключается возможность проявления эхо-эффекта. Эхо-эффект определяется попаданием в тракт передачи эхо-сигналов, вернувшихся по приемному тракту, причем временна́я задержка эхо-сигналов определяется временем распространения радиосигнала в прямом и обратном направлениях линии дальней связи: $\tau = 2(t_р + t_а + 2t_л)$, где $t_р$ — время распространения сигнала в канале дальней связи; $t_а$ — время задержки в аппаратуре связи (для радиокомпандера $t_а \approx 20$ мс); $t_л$ — задержка в абонентской линии.

Максимальное время задержки в наземном тракте дальней связи составляет 67 мс, а в радиоканале, особенно спутниковом, значительно больше, запаздывание в абонентских линиях может составить 12 мс. Следовательно, среднее время появления эхо составляет 100÷200 мс, и эхо-сигнал находится в области повышенной слуховой чувствительности. Хотя вид (конструкция) эхо-заградителя не регламентируется МККР, основные параметры приборов, устанавливаемых на обоих концах радиолинии, должны соответствовать рекомендациям МККТТ (ст. 161 и ст. 162, Белая книга МККТТ, том III). Эхо-заградитель блокирует тракт передачи слушающего местного абонента. Время блокировки — около 50 мс. Тракт замолчавшего абонента принимает исходное состояние не раньше прихода эхо-сигналов (200—1200 мс), что обеспечивает работу в наземных и космических каналах связи. При одновременном разговоре обоих абонентов в их приемные тракты вводится затухание около 6 дБ, улучшающее отношение сигнал/эхо.

Принцип действия эхо-заградителя в пунктах *А* и *В* линии связи иллюстрируется на рис. 3.3. Во время, когда абоненты мол-

чат, ключи эхо-заградителей замкнуты (положение схемы *а*). Когда говорит один абонент, например абонент *А* (положение схемы *б*), второй абонент *В* только слушает, так как цепь его передачи разомкнута. В цепь приема абонента *А* в это время введено затухание (6 дБ), чтобы ослабить шумы радиоприемника. Такая же схема действует, когда говорит абонент *В*, а слушает абонент *А* (соответственно замкнут ключ в цепи приема и разомкнут ключ в цепи передачи пункта *А*, замкнут ключ в цепи передачи и разомкнут ключ в цепи приема в пункте *В*). Таким образом, обеспечивается поочередный диалог собеседников. При одновременном разговоре (перебой) ключи в трактах передачи замыкаются, а ключи в трактах приема размыкаются (положение схемы — *в*), уменьшая уровень принимаемых каналов. Поскольку дополнительное затухание в 6 дБ вводится в оконечных пунктах радиолинии, то дополнительное затухание эхо-сигналов составляет 12 дБ. При непрерывном сравнении уровней передачи и приема легко обнаружить превышение уровня передачи и поэтому режимы работы эхо-заградителя (*а*, *б*, *в*) переходят из одного в другой автоматически. Дополнительной функцией эхо-заградителя в системе с управляемым компандированием является эффект поддержания негласности радиосвязи. Дело в том, что компрессор усиливает эхо-сигналы и, таким образом, можно прослушать переговоры двух абонентов с помощью одного радиоприемника. (Компрессированная речь остается достаточно разборчивой). Наличие эхо-заградителя исключает возможность усиления эхо-сигналов и, следовательно, одним радиоприемником невозможно прослушать диалог абонентов. Недостатком всех существующих до сих пор систем эхо-заградителей и эхо-компенсаторов (устройств, компенсирующих эхо-сигналы без прерывания трактов передачи и приема) является их низкая помехоустойчивость, обусловленная следующими основными причинами:

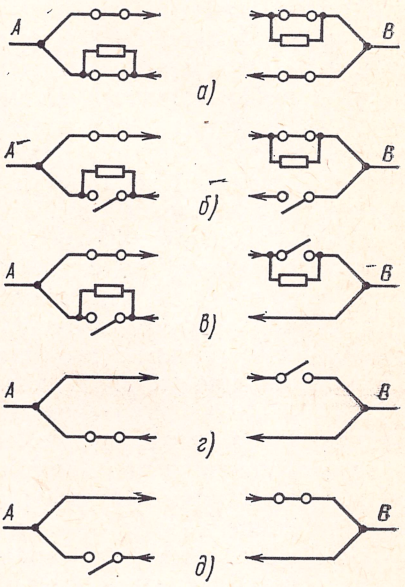


Рис. 3.3. Иллюстрация режимов работы эхо-заградителя

— управление эхо-заградителями и эхо-компенсаторами ведется голосом, т. е. шумовая полоса канала управления равна полосе звукового канала;

— мощность передатчика не используется во время выключения тракта передачи (в паузах речи);

— тракт приема остается включенным во время выключения передатчика, т. е. радиоприемник усиливает шумы канала за счет действия цепи авторегулировки усиления.

Указанные недостатки исключаются применением эхо-заградителя, управляемого по узкополосному каналу радиокомпандера [60], что существенно повышает помехоустойчивость радиосвязи. Принцип действия советского эхо-заградителя, предложенного в МККР при разработке радиокомпандера АРКА [69], заключается в том, что тракт местной передачи не прерывается, а воздействие эхо-сигналов исключается запиранием экспандера дальнего абонента. Соответственно при разговоре дальнего абонента (пункт B) запирается его экспандер (рис. 3.3*г*), а при разговоре местного абонента (пункт A) запирается экспандер пункта A. Итак, вместо того чтобы «закрывать рот говорящему», как это делается обычно, целесообразнее «закрывать говорящему уши».

Такое изменение принципа управления эхо-заградителем позволяет использовать управляющий канал радиокомпандера для переключения режимов эхо-заградителя, причем сигналом коммутации служит сигнал паузы (частота 2960 Гц).

Использование управляющего сигнала радиокомпандера для управления эхо-заградителем позволяет повысить помехоустойчивость канала радиосвязи за счет уменьшения ложных срабатываний эхо-заградителя под влиянием помех (шумовая полоса заградителя уменьшается в K раз): $K=\Delta F_з/\Delta F_у$, где $\Delta F_з$ — полоса звукового подканала, а $\Delta F_у$ — полоса управляющего подканала.

Кроме того, мощность передатчика во время пауз может эффективно использоваться для передачи управляющего сигнала, причем выигрыш в помехоустойчивости эхо-заградителя за счет увеличения мощности управляющего сигнала составляет M раз: $M=P_{уп}/P_у$, где $P_у$ — мощность управляющего сигнала во время передачи речи, а $P_{уп}$ — мощность управляющего сигнала во время передачи пауз.

В-третьих, помехоустойчивость эхо-заградителя увеличивается в связи с тем, что при запирании местного экспандера не прослушиваются шумы радиоприемника и, следовательно, исключается возможность проникновения помех в тракт передачи (конечно, до предела сбоя канала управления). При этом не требуется понижать уровень принимаемых сигналов на 6 дБ.

Интересно отметить, что аналогичное предложение было представлено в МККР Японией. Предложения СССР и Японии были объединены в Отчете МККР № 354—1 [59] в специальном разделе 4 «Модификация системы «Линкомпекс» с эхо-заградителем».

1. Для радиотелефонных линий, оснащенных системой «Линкомпекс», обычно необходимы устройства с эхо-заградителем (МККР Рекомендация G. 161) на оконечных пунктах звуковых каналов для того, чтобы преодолеть трудности, связанные с явлением эхо, которое возникает в результате неполного баланса четырех-двухпроводного переходного соединения.

2. В Док. 3/47 (Япония), в Док. 3/57 (СССР) описаны методы, которые используют канал управления системы «Линкомпекс» и обеспечивают эхозаграждение внутри системы «Линкомпекс». Разработанные независимо двумя администрациями эти способы основаны на почти идентичных принципах.

3. Обе системы заставляют расширитель динамического диапазона на дальнем конце обеспечивать максимальное затухание, когда уровень принимаемого сигнала на ближнем конце выше уровня передаваемого сигнала на ближнем конце; расширитель динамического диапазона на дальнем конце работает в нормальном режиме, когда уровень передаваемого сигнала на ближнем конце выше уровня принимаемого сигнала на ближнем конце.

Между этими двумя системами существуют три основных различия:

— в советской системе расширитель динамического диапазона на дальнем конце обеспечивает максимальное затухание до тех пор, пока передаваемый сигнал на ближнем конце не превышает заданный пороговый уровень;

— в японской системе расширитель динамического диапазона на дальнем конце обеспечивает максимальное затухание, когда принимаемый сигнал на ближнем конце превышает заданный пороговый уровень, за исключением случая нарушения условия;

— в японской системе расширитель динамического диапазона на ближнем конце обеспечивает добавочное затухание порядка шести дБ, когда передаваемый сигнал на ближнем конце превышает уровень принимаемого сигнала на ближнем конце на заданную величину.

4. Испытания моделированных радиоустройств с задержкой до 100 мс (Док. 3/47) и на длинных ВЧ радиолиниях (Док. 3/57) показывают, что обе системы работают удовлетворительно и, кроме того, совместимы, когда дальний конец звукового канала оснащен любыми другими эхо-заградителями.

5. В Док. 3/47 высказывается предположение, что эксплуатационные параметры в основном соответствуют характеристикам для систем с эхо-заградителем, изложенным в МККР, Рекомендации G.161.

6. Подробное описание японской и советской систем изложены в приложении к этому отчету.

Приложение. Новое выполнение эхо-заградителя для системы «Линкомпекс».

1. Основой новой системы служит компаратор, который анализирует уровни сигналов на четырехпроводной стороне гибридного соединения системы. Выход компаратора соединен с управляемым частотным модулятором. Во время приема речи дальнего абонента на входе компаратора преобладает сигнал приемной стороны. Компаратор формирует выходной сигнал, который используется для «привязки» регулируемой частоты частотного модулятора к верхнему пределу его диапазона; следовательно, расширитель динамического диапазона на дальнем конце радиолинии мешает прохождению любого эхо с ближнего конца. Во время передачи речи с ближнего абонента на входе компаратора преобладает сигнал передачи. Сигнал на выходе компаратора не определяет частоты управляемого генератора, который таким образом работает нормально. С учетом допустимых ошибок в соотношении уровней огибающей и сигнала регулируемого канала и для снижения чувствительности к уровням интерферирующего сигнала, сигнала шума и несущественного сигнала, компаратор выполнен пороговым.

Системы, описанные в Документах 3/47 и 3/57, главным образом отличаются конструкцией компараторов, и основные различия могут быть выявлены в следующих их описаниях.

2. Исходный документ 3/47 (Япония).

2.1. Основное содержание

На рис. 3.4 схематически представлены компаратор сигналов и связанные с ним элементы системы «Линкомпекс».

Действие системы можно описать следующим образом.

При наличии только принимаемых сигналов (никаких передаваемых сигналов, кроме эхо), когда сигнал постоянного тока на выходе частотного дискриминатора *1* превышает заданный пороговый уровень, пороговый детектор *2* выдает сигнал, который проходит через неоперативный замедлитель *3* для фиксации частотного модулятора *4* на частоте 2980 Гц. Расширитель динамического диапазона удаленного абонента подавляет выходной сигнал приемной стороны в этом терминале. На выходе амплитудного компаратора *5* не возникает никакого сигнала.

При наличии только передаваемых сигналов на выходе порогового детектора *2* не возникает никакого сигнала; амплитудный компаратор *5* выдает сиг-

нал; частотный модулятор *4* функционирует нормально; регулятор дискриминатора 1 снижает уровень выходного сигнала относительно принимаемого на 6 дБ.

При наличии как приемных, так и передаваемых сигналов:

(а) Когда преобладает передаваемый сигнал, работа происходит как в предыдущем случае, однако действует пороговый детектор *2*.

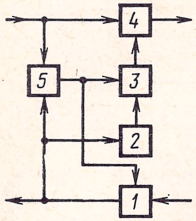


Рис. 3.4. Структурная схема узкополосного эхозаградителя (Япония)

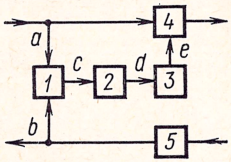


Рис. 3.5. Узкополосный эхо-заградитель (СССР)

(б) Когда преобладает принимаемый сигнал, на выходе амплитудного компаратора *5* не возникает никакого сигнала. Частота модулятора *4* фиксируется (2 980 Гц), если действует пороговый детектор *2*.

3. Результаты испытаний

Новая система работает нормально при затухании эхо, проходящего через четырехпроводное терминальное устройство с соотношением уровней, превышающим 4 дБ.

Приемлемое качество речи было получено при испытании имитирующего устройства для случая протяженных радиолиний с временем однонаправленного распространения порядка 10 мс.

Испытания, которые проводились относительно терминалов системы «Линкомпекс», один из которых был оснащен новой системой эхозаграждения, а другой — стандартным эхо-заградителем, показали, что эти терминалы полностью совместимы.

ТАБЛИЦА 3.1

Установившийся уровень	Время действия, мс
6 дБ>порога	3,5
3 дБ>порога	11,0

Типичные данные испытаний по эхозаграждению сведены в табл. 3.1.

4. Исходный документ 3/57 (СССР).

4.1. Основное содержание

На рис. 3.5 схематически показан компаратор сигналов и связанные с ним элементы системы «Линкомпекс» для одного из возможных вариантов системы.

Работа системы осуществляется следующим образом:

Компаратор сигналов включает блоки *1, 2* и *3*. Потенциал в точке *e* пропорционален разности в уровнях между передаваемой и принимаемой сторонами (*1* — сравнитель; *2* — интегратор; *3* — управитель; *4* — частотный модулятор; *5* — частотный модулятор).

При условии отсутствия как передаваемого, так и принимаемого сигналов сигнал на выходе блока *3* «привязывает» частоту генератора *4* к верхнему пределу его диапазона, и расширитель динамического диапазона на дальнем конце заперт.

Когда воздействуют только принимаемые сигналы, работа осуществляется как в предыдущем случае.

Когда имеются только передаваемые сигналы (*a*), потенциал в точке (*e*) изменяется. Когда заданный пороговый уровень в точке *d* превышается, сигнал на выходе блока *3* отсутствует, и генератор *4* работает нормально.

Когда присутствуют как передаваемые (*а*), так и принимаемые сигналы (*в*), по соотношению уровней а/в определяется, какой сигнал преобладает (*с*). Временна́я диаграмма работы советского эхо-заградителя показана на рис. 3.6.

4.2. Результаты испытаний

Линейные испытания на различных радиотелефонных линиях показывают высокую степень эффективности подавления эхо-сигналов и зуммирования. Доказано, что новая система является полностью совместимой с терминалами системы «Линкомплекс», оснащенными функционально независимыми эхо-заградителями.

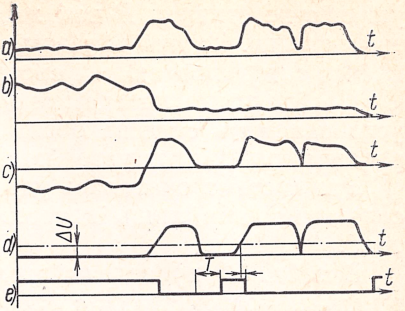


Рис. 3.6. Временна́я диаграмма работы узкополосного эхо-заградителя

В результате испытаний становится очевидным, что система нового типа с эхо-заградителем улучшает качество передачи радиолиний и повышает надежность аппаратуры. Рабочее время τ и время спада T эхо-заградителя соответственно составляют 4 мс и 200 мс.

Помехоустойчивость радиоканала телефонной связи повышается за счет новой возможности трансляции вызывных сигналов. Своевременный и безошибочный вызов оператора или абонента по радиоканалу сокращает время, необходимое на организацию связи, а следовательно, повышает полезную «коммерческую» загрузку радиолинии.

Передача традиционных вызывных сигналов в полосе телефонного канала (колебание частоты 1000 Гц, манипулированное по амплитуде с частотой 20 Гц — 1000/20 Гц) не обеспечивает необходимой точности приема вызова, а также допускает ложные вызовы при радиоприеме речевых сигналов или помех.

Между тем помехоустойчивая передача вызывных сигналов необходима для создания сетей радиосвязи, в особенности с подвижными объектами (судами, самолетами, наземным транспортом), обеспечивая экипажам и пассажирам выход в междугородную телефонную сеть. Недостаточная помехоустойчивость приема амплитудно-манипулированных вызывных сигналов потребовала перехода к частотной манипуляции.

Ввиду трудности соединения ВЧ радиотелефонных цепей с международными автоматическими станциями, использующими сигнальный код № 4 или № 5 МККТТ, французская администрация связи разработала и ввела в эксплуатацию в 1966 г. полуавтоматические устройства с ручным набором и частотной манипуляцией [70].

Цепь радиовызова специально предназначена для обмена между исходящей станцией стороны *A* и входящей станцией стороны *B*. Сигналы, полученные от оператора станции *A* — начало, набор номера, отбой — превращаются в сигналы звуковой частоты с помощью устройства, размещенного на оконечном радиоцентре. Сигналы передаются на другое оконечное радиоустройство, где приемное устройство восстанавливает выходные сигналы и осуществляет начало, набор номера и т. д. на автоматическом переключающем

устройстве станции *B* так же, как это должен делать абонент в этой стране. Таким образом, оператор в *A* «дистанционно соединяется с переключающей системой в стороне *B*».

Необходимые передающие и приемные устройства могут быть установлены в сети на обеих оконечных станциях без какой-либо реконструкции этих устройств.

Эта система оказалась удовлетворительной, и ее использование ограничивается лишь качеством канала, используемого для вызова.

В табл. 3.2 приведены различные сигналы, передаваемые между двумя устройствами с набором:

— передающее устройство (помещенное на «передающем» выходе сети на стороне *A* и соединенное с операторной);

— приемное устройство (помещенное на «приемном» входе сети на стороне *B* и соединенное с автоматическим переключающим устройством).

ТАБЛИЦА 3.2

Информация	Сигнал	Модуляция ЧМ	Длительность
Начало [1]	ЧМ сигнал тональных частот ±85 Гц	50 Гц	300 мс
Набор номера [1]	1260 или 1620 или 1980 или 2340 Гц	Со скоростью набора номера (66/33 мс)	Определяется номером
Конец набора номера [2]	То же	50 Гц	300 мс
Отбой [1]	»	50 Гц	650 мс

[1]) Информация, подаваемая оператором в операторную.
[2]) Информация, подаваемая интегральной частью передающего устройства. Этот определенный сигнал не предназначается для передачи на автоматичское переключающее устройство, но он позволяет устройствам с набором вновь соединить элементы коммутации сетей так, чтобы мог иметь место вызов.

Во время разговора только детектор отбоя, который не является типовым для телефонных сетей, действует в приемном устройстве. Однако переход от амплитудной к частотной манипуляции еще не исчерпывает резервов повышения помехоустойчивости, так как не учитывает возможностей и спецификации управляемого компандирования. Дело в том, что помехоустойчивость приема вызывных сигналов, проходящих по телефонному каналу, может быть повышена за счет использования узкополосного управляющего подканала с частотной модуляцией. При передаче традиционных вызывных сигналов с АМ или ЧМ управляющий подканал лишь фиксирует наличие или отсутствие сигналов, отпирая или запирая управляемый экспандер, в то время как возможно использование узкополосного канала для помехоустойчивой передачи самих сиг-

налов. Более того, передача традиционных вызывных сигналов по тракту с управляемым компандированием чревата появлением временных искажений, что ухудшает помехоустойчивость вызова. Так, например, при временно́м рассогласовании звукового и управляющего сигналов на входе экспандера в 10—20 мс звуковой сигнал практически не пострадает, тогда как вызывные сигналы исказятся по длительности до 25%, что недопустимо. Так что в тракте с управляемым компандированием возможно и необходимо совершенствование способа вызова абонента.

На рис. 3.7 показана структурная схема помехоустойчивой передачи вызывных сигналов, а на рис. 3.8 дана соответствующая

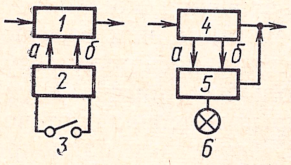


Рис. 3.7. Структурная схема вызывного тракта

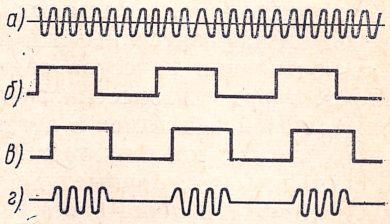


Рис. 3.8. Временна́я диаграмма передачи вызова

временна́я диаграмма для случая передачи АМ сигналов (при передаче ЧМ сигналов схема и диаграмма не меняются). Здесь в радиокомпандер *1*, кроме речевого сигнала, вводятся вызывные сигналы (*а* и *б*) на рис. 3.7, поступающие с генератора вызова *2* при замыкании вызывающим оператором ключа *3*. Вызывной сигнал состоит из двух составляющих — немодулированного колебания тональной частоты (рис. 3.8*а*), передаваемого по звуковому каналу, и манипулирующих сигналов (рис. 3.8*б*), передаваемых по управляющему каналу. На приемной стороне вызывные сигналы *а* и *б* выводятся из приемной части радиокомпандера *4* в приемник вызова *5*, обеспечивающий визуальную сигнализацию *6* и передачу вызывного сигнала в телефонный тракт приемного пункта. В приемнике вызова могут быть реализованы все современные методы селекции одночастотного (или частотноманипулированого) сигнала, принятого по звуковому каналу [71], а также выделены вызывные сигналы, поступившие по управляющему каналу (рис. 3.8*в*). В случае трансляции вызова методом АМ вызывные сигналы формируются путем манипуляции принятого тонального сигнала, сигналами управляющего канала (рис. 3.8*г*), что исключает возможность возникновения временны́х искажений сигналов из-за рассогласования задержек в звуковом и управляющем каналах [72], а также позволяет регистрировать вызов по совпадению сигналов в обоих подканалах, что уменьшает вероятность ошибок. В случае трансляции вызова методом ЧМ возможно сопоставление сигналов, принятых по двум подканалам, т. е. сдвоен-

ный радиоприем вызывных сигналов с частотным разнесением и обнаружением ошибок.

Таким образом, используя подканал управления радиокомпандера для дублирования передачи вызывных сигналов, можно повысить помехоустойчивость радиоканала и обеспечить сопряжение радиолиний с телефонной сетью. Такая возможность имеет наибольшую ценность для подвижных объектов, экипажи которых получают возможность войти в наземные сети телефонной связи во время движения.

3.2. РАЗНЕСЕННЫЙ РАДИОПРИЕМ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

При радиоприеме сигналов одного передатчика несколькими приемниками, разнесенными в пространстве, реализуются возможности повышения качества связи без увеличения мощности передатчика. Эффект разнесенного приема тем выше, чем больше различаются свойства помех в ветвях разнесения, поскольку результирующий сигнал комбинируется из нескольких (обычно двух) копий сигналов, искаженные участки которых не совпадают во времени. Так, чем больше расстояние между пунктами радиоприема, тем слабее корреляция между искажениями детектированных сигналов [73]. Это объясняется тем, что радиосигналы поступают к приемным антеннам по разным путям, а местные помехи в точках приема различны. Особенное значение имеет дальнее пространственное разнесение для борьбы со станционными помехами, которые различно влияют в разных географических пунктах.

Разнесенный радиоприем с антенн одного радиоцентра менее эффективен, но более удобен в эксплуатации и, кроме того, позволяет получить несколько копий сигналов, разнесенных как по пространству, так и по поляризации или углу приема, причем в этих условиях различные виды разнесения обеспечивают приблизительно одинаковый эффект [73, 74].

Кроме упомянутых видов разнесения «по антеннам», которые не требуют дополнительных затрат или устройств на стороне передачи, также используются методы частотного, временно́го или совместного частотно-временно́го разнесения, при которых копии сигналов излучаются передатчиком со сдвигом по частоте и во времени [4, 5]. Такие виды разнесения целесообразно использовать в системах радиосвязи с подвижными объектами, где нет возможности применять разнесение антенн в пространстве. Физические основы разнесенного радиоприема едины для любого вида информации, однако реализация устройств объединения разнесенных звуковых сигналов имеет свои особенности.

Сущность разнесенного приема звуковых сигналов состоит в автовыборе наиболее «громких» фрагментов сигналов из ветвей разнесения и комбинации из них результирующего сигнала. Применение автовыбора сигналов вместо их сложения объясняется тем, что при сложении некогерентных разнесенных сигналов, имеющих произвольные фазовые сдвиги, возможны нелинейные искажения сум-

марного сигнала. Кроме того, известно [17], что при сложении двух случайных сигналов, подчиняющихся нормальному закону распределения, образуется новый случайный сигнал с нормальным распределением и средней мощностью, равной сумме средних мощностей складываемых сигналов. Поскольку помехи суммируются по тем же законам, отношение сигнал/помеха в среднем остается таким же, как при одинарном приеме. По тем же причинам сложение разнесенных звуковых сигналов неэффективно и при замираниях.

Автовыбор разнесенных звуковых сигналов имеет свои сложности. Так, при переключении с приемника на приемник слушатель ощущает щелчки или скачки уровня. Кроме того, возможен эффект «подмены собеседника», возникающий при различной тембровой окраске сигналов в ветвях разнесения. Поэтому оценка эффективности разнесенного радиоприема выполняется экспериментально, а устройства автовыбора непрерывно совершенствуются [9].

Устройства разнесенного приема выделяются из состава радиоприемников в самостоятельный класс аппаратуры связи. Важность и актуальность решения задачи разнесенного приема в трактах с управляемым компандированием определяется тем обстоятельством, что современные радиоприемники не содержат устройств сложения разнесенных звуковых сигналов [40]. Целесообразность применения разнесенного радиоприема на международных линиях коротковолновой связи показана специальными исследованиями, выполненными на радиолинии «Европа — Америка» при большой базе пространственного разнесения [75]. Поскольку помимо отсутствия корреляции быстрых замираний (из-за фазового искажения радиочастотных сигналов) на приемных станциях, разнесенных друг от друга на десятки километров, наблюдается некоторое уменьшение корреляции и медленных замираний, то для исследования последних были проведены испытания между радиостанциями на телефонной линии от Амстердама, действующей на частоте 10 МГц в классе излучения А3А с двумя приемниками в Нью-Джерси, разнесенными на расстояние приблизительно 135 км.

Выходные сигналы обеих антенн регистрировались в течение всех рабочих часов на протяжении десяти месяцев с использованием аппаратуры записи с постоянной времени 40 с. Анализ графиков самописцев позволил сделать ряд выводов:

— обычно наблюдалась разница в условиях разнесенных сигналов до 10 или 20 дБ в течение часа или более, несмотря на тот факт, что была хорошая корреляция между общими (часовыми медианными) уровнями на обоих пунктах приема как в течение дней нормального прохождения радиоволн, так в течение магнитовозмущенных дней;

— как и следовало ожидать, разнос между станциями не ослаблял заметно внезапные ионосферные возмущения, и вообще, в те дни, когда нарушалось прохождение, улучшение между уровнями двух ветвей радиосети (в децибелах) в среднем заметно не отличалось от улучшения, достигнутого в другие дни. Распределе-

ние одновременных ухудшений приема (в децибелах) между выходами антенн приближалось к нормальному, а стандартное отклонение этого распределения (в течение периода анализа, составляющего примерно три месяца) составляло 8,5 дБ. Корреляция между обоими выходами составляла около 0,85; средняя разница (в течение этого периода) составляла 0 дБ; средняя величина улучшения сигнала (в децибелах) — полезная половина времени— составляла 7 дБ. В течение 2/3 времени, когда сигнал в ветви разнесения ослабляется более чем на 20 дБ от медианы, среднее улучшение превышало 8 дБ; а для 15% этого времени — превышало 23 дБ.

Чтобы использовать потенциально возможное улучшение сигнал/шум, следовало использовать устройство автоматической селекции и необходимые дополнительные проводные линии. Время простоя канала, являющегося результатом плохого радиоприема, зависит от уровня сигнала относительно медианной величины, представляющего предел коммерческого использования. Последний, в свою очередь, зависит в значительной степени от шума. Если уровень эффективного шума на входе приемника преимущественно постоянный (как это имеет место при шумах приемника или в меньшей степени космических шумах), то распределения отношения сигнал/шум будут иметь те же различия, что и различия сигналов. При этом в идеальной системе автовыбора часть времени простоя канала на линии «Амстердам — Нью-Джерси» (18 МГц) приблизительно составляла бы 1/3.

Метод автовыбора является также эффективным в случае помех в совпадающих каналах от дальней мешающей станции. Во время испытаний наблюдался заметный эффект разнесения между сигналами от радиопередатчика в Амстердаме и сигналами мешающей телефонной станции в Европе. Иногда в течение ряда часов в исследуемом канале находился телеграфный сигнал и в течение этих периодов наблюдалось изменение в широких пределах его уровня относительно сигнала принимаемой станции.

Иногда наблюдались также большие различия между входными уровнями сигналов на приемных пунктах относительно мешающих телеграфных сигналов и еще бóльшие различия на выходах приемников, усиления которых контролировались по сигналам радиостанции в Амстердаме. Этот эффект «сложного» разнесения иногда был настолько велик, что помехи могли бы сделать один приемник некоммерческим и в то же самое время были бы едва слышимы на другом. Этот эффект может иметь все более важное значение при решении проблемы в будущем, когда радиоприем может все больше ограничиваться мешающими сигналами, а не радиошумом. Кроме упомянутых испытаний было сравнение нескольких тысяч парных измерений отношения сигнал/шум на двух пунктах разнесения с использованием аналогичных приемных антенн на линии от Лондона. Показано, что среднее улучшение разнесения (в полезную половину времени), которое обеспечивала бы система идеального автовыбора, составляло 5,5 дБ. (Данные по

нескольким рабочим частотам объединялись при получении этих результатов.) Величину 5,5 дБ можно сравнить с величиной 7 дБ, указанной выше для испытаний, проведенных на линии от Амстердама, и основанную только на записях сигнала, а не на записях отношения сигнал/шум.

Затем использовался экспериментальный компаратор для выбора сигнала лучшей ветви разнесения. Этот компаратор измерял принимаемые шум и помехи во время передачи речи и выбирал выход приемника с меньшим шумом. Постоянные времени были таковы, что переключатель не срабатывал от отдельных импульсов шума. Выходные шумовые сигналы в каждой ветви записывались на двойном самописце, который был оборудован также специальным самописцем для обеспечения непрерывной регистрации положения переключателя ветвей.

Эксперименты показали, что медианное значение улучшения превышает 3 дБ для 1% времени, а в периоды глубоких замираний это улучшение составляет 7 дБ. Естественно выигрыш отсутствует при малом уровне шумов.

Полученные данные относятся лишь к системам разнесения с большой базой (сотни, тысячи километров) и не свидетельствуют о том, что аналогичные условия сохраняются в пределах одного радиоцентра. Однако на приемных станциях, находящихся на расстоянии десятков километров, отмечается отсутствие корреляции скорости замираний. При измерениях не пытались определить корреляцию медленного замирания как функцию расстояния между приемными пунктами. Кроме расстояния, другие топографические различия, влияющие на характеристику антенн, различно влияют на результаты. Выполненные исследования подтверждают рекомендацию о целесообразности использования пространственного разнесения с большой базой для важных магистральных радиолиний. При ближнем разнесении в пределах одного радиоцентра, где некоррелированы только быстрые и селективные по частоте замирания, могут эффективно использоваться устройства пространственного разнесения с расщеплением звуковой полосы. Одно из таких устройств обеспечивает автовыбор бо́льшего по уровню сигнала в каждой из трех полос, составляющих стандартный телефонный канал. В каждом из частотных подканалов производится авторегулировка усиления, причем сигналом управления служит сигнал разности сравниваемых уровней напряжений в ветвях разнесения. После регулировки усиления в каждом из трех полос звуковой сигнал восстанавливается путем линейного сложения трех составляющих сигналов. Такая обработка сигнала позволяет уменьшить влияние селективных замираний, а также уменьшает заметность шума и щелчков переключения ветвей разнесения.

Испытания системы показали, что качество выходного звукового сигнала улучшается по сравнению со случаем одинарного радиоприема при любой глубине замирания.

Линейные испытания другого варианта системы с расщеплением полосы выполнены на радиотелефонной линии «Нью-Йорк —

Франкфурт». Выходные сигналы звуковой частоты обоих пространственно-разнесенных приемников разделялись путем расщепления их на пять полос шириной 550 Гц (с помощью блока фильтров стандартного устройства негласности). Переключающее устройство обеспечивало выбор из каждых пяти пар частотных полос соответствующих разнесенных сигналов с бóльшей амплитудой. Сложный телефонный сигнал затем сравнивался с сигналами на выходах двух приемников. Принимались специальные меры для устранения влияния неидентичности характеристик двух приемников и соединительных линий, устройств автовыбора и аппаратов для звукозаписи.

Результаты испытаний позволили сделать ряд выводов.

Так, оказалось, что для «едва приемлемого коммерческого качества» с двойным разнесенным приемом и с выбором пяти частичных полос данный метод обеспечил существенное снижение вероятности замирания или долю времени замирания в период работы (глубина замирания не менее чем на 10 дБ ниже медианной величины) — приблизительно до 20% от величины, без селекции.

Переход на многократный разнесенный прием и разделение звуковой полосы на бóльшее число частичных полос по сравнению с используемыми в испытаниях заметно не увеличит эффективность. Подчеркивается, что метод приводит к существенному повышению натуральности воспроизведения речи, но не обеспечивает заметного увеличения разборчивости. Поэтому предполагается, что улучшение разборчивости не может составлять больше нескольких процентов. Например, чем выше качество передачи, характеризуемое индексом артикуляции, тем меньше улучшение, которое можно получить.

В симплексных системах передачи звуковых сигналов, например при передаче или ретрансляции программ вещания, могут использоваться системы с временны́м разнесением расщепленных участков звукового спектра. В дуплексных системах радиотелефонии временно́е разнесение обычно не может применяться, поскольку время задержки мешает свободному диалогу. Так, в системе «Эхоплекс» время задержки сигналов составляет 1 с [75].

Структурная схема системы «Эхоплекс» показана на рис. 3.9. Звуковые сигналы поступают на ряд полосных фильтров (*1*—*6*), выходы которых объединены в три группы, причем так, что каждая группа содержит два фильтра, выделяющих частотные полосы, разделенные интервалом, обеспечивающим частотную независимость замираний. Так, в первую группу могут входить фильтры *1* и *4* (средние частоты 360 и 1430 Гц), во вторую — фильтры *2* и *5* (средние частоты 570 и 2270 Гц), а в третью — фильтры *3* и *6* (средние частоты 200 и 3600 Гц). Выходные сигналы трех пар фильтров поступают к передатчику с временно́й задержкой, различной для каждой группы. Сигналы первой пары направляются к радиопередатчику *9* без задержки, сигналы второй пары задерживаются на 0,5 с (блок задержки *7*), а сигналы третьей пары следуют с задержкой в 1 с (блок *8*).

Таким образом, излучаемый радиосигнал содержит шесть частотных составляющих, сдвинутых во времени так, что одновременное замирание может поразить разные частотные и временные участки сигнала. С радиоприемника *10* сигнал поступает на параллельно включенные фильтры *1—6*. Первая пара фильтров (*1, 4*)

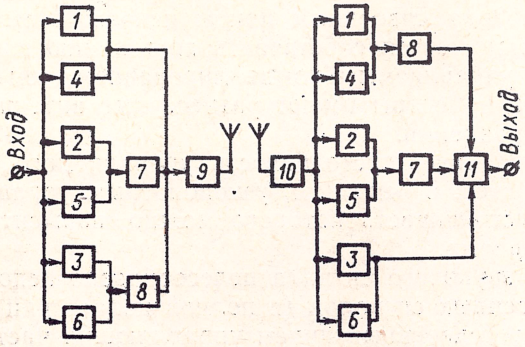


Рис. 3.9. Структурная схема системы «Эхоплекс»

подключена к объединяющему устройству *11* через блок задержки *8* (время задержки — 1 с), вторая пара — фильтры *2* и *5* — через блок задержки *7* (время задержки — 0,5 с), а третья пара фильтров (*3* и *6*) соединена с выходным блоком *11* непосредственно. Таким образом, на входе сумматора *11* восстанавливается исходный звуковой сигнал, задержанный на 1 с.

При общем замирании длительностью меньше 1 с пропадания звука не ощущается, хотя трижды (в разные моменты времени) замирают его частотные составляющие. Сначала замирают сигналы в фильтрах *1* и *4*, через полсекунды — в фильтрах *2* и *5*, через секунду — в фильтрах *3* и *6*. Поскольку звуковой сигнал имеет большую избыточность, а интервал между замираниями превышает время действия замирания, система временного разнесения обладает следующими преимуществами:

— если замирание длится меньше секунды, оно не прослушивается;

— обеспечивается снижение пикового уровня звукового сигнала на 6—7 дБ при постоянном среднем уровне, а энергия сигнала распределяется равномернее во времени;

— обеспечивается эффект неразглашения речи, поскольку для случайного слушателя, не имеющего приемного полукомплекта, речь кажется неразборчивой.

Рассмотренные методы разнесенного приема позволяют улучшить качество радиосвязи и могут использоваться не только порознь, но и вместе — например, возможно сочетание устройств частотно-временно́го и пространственного разнесения.

Что касается применения разнесенного радиоприема в системах с управляемым компандированием, то здесь имеются некоторые особенности.

До сих пор радиокомпандеры использовались с одинарным приемом, причем отмечалось, что эффективность радиокомпандера выше, нежели может обеспечить разнесенный радиоприем [75]. Однако поскольку сдвоенный прием используется в радиосвязи, постольку он может способствовать повышению качества связи и в каналах с управляемым компандированием, тем более, что современные радиоцентры имеют разнесенные антенны практически в любом направлении.

Кроме того, помехоустойчивость управляемого компандирования определяется, в основном, узкополосным управляющим каналом, помехоустойчивость которого можно повысить посредством сдвоенного приема.

Если для звукового сигнала целесообразно использовать автовыбор разнесенных сигналов (в полной полосе или с расщеплением полосы), то сдвоенный прием управляющих частотномодулированных сигналов можно реализовать как методом автовыбора, так и методом сложения детектированных сигналов. Возможно и додетекторное когерентное сложение управляющих сигналов, однако этот метод требует автоматического фазирования объединяемых сигналов с частотной модуляцией [76], что сложно осуществить.

Важно отметить, что радиокомпандер АРКА с эхо-заградителем, управляемым по узкополосному каналу, позволяет обеспечить помехоустойчивое управление коммутирующим элементом устройств автовыбора, а также исключить заметность переключений (щелчки коммутации) путем переключения ветвей разнесения во время пауз речи, т. е. в моменты, когда экспандер заперт.

Структурная схема радиокомпандера со сдвоенным радиоприемом представлена на рис. 3.10. Сдвоенный радиокомпандер со-

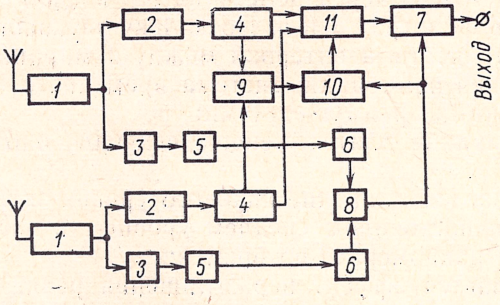


Рис. 3.10. Структурная схема радиокомпандера для разнесенного приема

держит полный приемный комплект, упрощенный комплект и блоки их объединения. Радиосигналы с разнесенных антенн транслируются приемниками *1* к обоим ветвям разнесения. В каждой из

ветвей сигналы разделяются фильтрами *2* и *3* на звуковой и управляющий. Звуковые сигналы, как обычно, поступают на регулятор замираний *4*, а управляющие соответственно на последовательно включенные ограничитель *5* и частотный дискриминатор *6*. Выходным блоком устройства является экспандер *7*, который управляется суммарным сигналом, поступающим с двух дискриминаторов *6* через объединитель *8*. Объединитель *8* может быть выполнен поразному в зависимости от критерия автовыбора или сложения сигналов, однако его функциональное место определяется однозначно.

Автовыбор звуковых сигналов следует осуществлять во время пауз, когда экспандер *7* запирается и, следовательно, исключается прослушивание коммутационных щелчков. Таким образом, частота коммутации определяется слоговой частотой, т. е. возможно комбинирование воспроизводимого слова из слогов, которые приняты по разным путям распространения. Сравнение сигналов в ветвях разнесения удобно производить при сопоставлении управляющих сигналов регуляторов замираний *4*. Поскольку с передатчика излучается звуковой компрессированный сигнал, а в радиоприемнике действует авторегулировка усиления, сглаживающая медленные замирания, то изменения огибающей сигнала определяются только замираниями радиосигналов или наличием помех. Несмотря на то, что регулятор замираний восстанавливает форму огибающей, он имеет ограниченный диапазон (15—20 дБ) регулирования, вне которого изменения уровня не компенсируются. Поэтому важно, чтобы на экспандер *7* поступал сигнал с того регулятора *4*, который находится в данное время в лучших условиях, т. е. производить автовыбор разнесенных сигналов по минимальным искажениям огибающей. Возможны и другие признаки автовыбора — например, автовыбор по минимальным шумам в паузе. Независимо от критерия сравнения сигналов функциональные блоки автовыбора (сравнитель *9*, селектор *10* и коммутатор *11*) включены так, что выход сравнителя подключен к управляющему входу селектора *10*, разрешающий вход которого объединен с управляющим входом экспандера *7*. Таким образом, селектор *10* выделяет сигнал автовыбора только в паузах речи при фиксированном уровне управляющего сигнала. Сигнал автовыбора поступает на коммутатор *11*, который обеспечивает подключение к входу экспандера выходного сигнала с первого или второго регулятора замираний и именно с того, на входе которого в данный момент времени имеется лучший сигнал.

Поскольку усиление регулятора замираний *4* обычно составляет 15—20 дБ, а усиление управляемого компрессора не превышает 40 дБ, то для входных уровней звуков, ниже уровня компрессии, компрессор является линейным усилителем и улучшение отношения сигнал/помеха в этой области компандированием не достигается, что определяет целесообразность автовыбора разнесенных сигналов на входе управляемого экспандера.

Анализ структурной схемы радиокомпандера сдвоенного радиоприема свидетельствует о том, что сдвоенный приемный полуком-

плект может быть скомплектован из двух одинарных полукомплектов путем добавления несложных устройств сравнения *9*, селекции *10* и коммутации *11*.

Следовательно радиокомпандер АРКА, сконструированный в виде спаренного комплекта [64], может быть переведен в режим сдвоенного радиоприема. При этом следует помнить о том, что радиоприемники, используемые для сдвоенного приема, должны иметь общий синтезатор частоты.

В заключение анализа специфики разнесенного радиоприема компандированных сигналов можно отметить, что управляемый компандер по принципу действия сам является системой с информационно-частотно-временны́м разнесением, поскольку частотная составляющая звуковой информации передается в полосе частот (300—2700 Гц), а амплитудная составляющая — в полосе (2700—3000 Гц). Эта особенность системы с управляемым компандированием, естественно, способствует повышению помехоустойчивости. Помехоустойчивость радиокомпандера может быть повышена в результате временно́го разнесения [17]. В типовой аппаратуре блоки задержки речевого сигнала установлены на передаче и на приеме. Если же сосредоточить задержку только на приемной стороне и суммировать сигналы на входе и выходе блока задержки, то возможно добиться эффекта подавления помех, длительность которых не превышает времени задержки. Сложение сигналов, сдвинутых во времени, позволяет также маскировать селективные замирания, которые ввиду их кратковременности не сглаживаются. Подавление импульсных помех и быстрых замираний достигается тем, что элемент сигнала, пораженный импульсной помехой или быстрым замиранием, складывается с другим, сдвинутым во времени, неповрежденным элементом сигнала. Сложение сигналов, сдвинутых во времени, производится на входе экспандера, чем уменьшается вероятность нелинейных искажений звуков. Таким образом, только за счет перераспределения элементов задержки в тракте радиокомпандера можно подавить помехи и замирания, длительность которых меньше времени задержки. Время задержки должно быть меньше 50 мс, чтобы исключить прослушивание эхо, и больше 20—30 мс, чтобы уменьшить заметность интерференционных искажений.

3.3. ПЕРЕПРИЕМ КОМПАНДИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Как известно, переприем радиосигналов позволяет повысить надежность связи в результате оптимизации трассы и учета условий распространения радиоволн. Так, выгоднее использовать два последовательных односкачковых пролета радиосвязи протяженностью в 3000 км, чем однопролетную радиолинию большой протяженности [5]. При переприеме радиосигналов большое значение имеет выбор направления составляющих радиотрасс — например, замена широтной трассы (особенно захватывающей полярные области планеты) двумя трассами с выбором пункта переприема в эквато-

риальной полосе позволяет получить ощутимое увеличение надежности связи за счет уменьшения частоты радиомагнитных возмущений.

При передаче дискретных сигналов переприем обязательно сопровождается регенерацией, что позволяет избежать (или уменьшить) накопление ошибок, возникающих на каждом отдельном пролете составной радиотрассы [5].

Переприем аналоговых сигналов не обеспечивает такого преимущества, так как при усилении транслируемых сигналов невозможно отделить полезные сигналы от помех и искажений. Наоборот, при переприеме возможны искажения, возникающие в трактах демодуляции и вторичной модуляции. Сказанное особенно относится к однополосным радиосистемам, в которых звуковой сигнал подвергается многократным преобразованиям. Сильно влияет на снижение качества речи рассинхронизация в тракте радиосвязи, т. е. частотная расстройка между несущими частотами радиопередатчика и радиоприемника, причем отрицательное влияние рассинхронизации усиливается при наличии помех в канале связи, и, следовательно, для поддержания заданной разборчивости необходимо увеличение мощности сигнала.

При двухпролетных составных радиолиниях (а в практике радиосвязи такие трассы являются наиболее распространенными) максимальная рассинхронизация равна сумме частотных расстроек отдельных пролетов и, следовательно, качество связи соответственно ухудшается. Радиоканал с управляемым компандированием наиболее подвержен искажениям, возникающим из-за рассинхронизации, и поэтому переприем компандированных звуковых сигналов должен осуществляться с учетом минимизации частотных расстроек. Наконец, при переприеме компандированных сигналов возникают специфические искажения звуковых сигналов, вызванные деформацией огибающей речи из-за неидеальности динамических амплитудных характеристик компрессора, экспандера и модема канала управления.

Однако необходимость переприема компандированных сигналов определяется не только целесообразностью оптимизации режима эксплуатации радиолиний, но и развитием сети связи, так как радиоканал может служить звеном более сложного тракта. Все остальные варианты переприема проще, чем переприем на радиолинии, так как компандирование сигналов в каналах с постоянными параметрами протекает в относительно более легких условиях (отсутствие быстрых замираний и фазовых флуктуаций, эквивалентных частотной расстройке).

Рассмотрев задачу переприема компандированных сигналов в радиоканале, можно получить типовые решения и для других каналов связи. Возможны два варианта переприема — с восстановлением сигнала и без него. В первом случае на каждом из пролетов устанавливается автономный радиокомпандер, т. е. звуковой сигнал экспандируется в пункте переприема, а затем вновь компрессируется и подается на транслирующий радиопередатчик. Во

втором случае транслируемый сигнал передается на второй пролет без промежуточного преобразования и экспандируется только на приемном пункте второго пролета, т. е. в этом случае в точке переприема непосредственно соединяют выход радиоприемника с входом радиопередатчика.

Оба способа имеют существенные недостатки.

При переприеме с восстановлением звуков максимальные искажения огибающей U определяются суммой искажений, возникающих на каждом пролете из-за неидеальности динамических амплитудных характеристик компрессора $U_{к1}$, экспандера $U_{э1}$ и управляющего канала $U_{у1}$ на первом пролете и соответствующих искажений, возникающих на втором пролете $U_{к2}$; $U_{э2}$; $U_{у2}$

$$U_{макс} = U_{к1} + U_{э1} + U_{к2} + U_{э2} + U_{у1} + U_{у2}.$$

При переприеме без восстановления максимальные искажения, вносимые аппаратурой, меньше, так как

$$U_{макс} = U_{к1} + U_{э2} + U_{у}.$$

Однако вариант без восстановления звуков чувствительнее к замираниям сигналов. Действительно, если вероятность приема без замираний элемента звукового сигнала на первом пролете Q_1, а на втором Q_2, то вероятность замираний на двухпролетной трассе

$$P = 1 - Q_{12} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)$$

или

$$P = P_1 + P_2 - P_1 P_2 \approx P_1 + P_2.$$

Отсюда следует, что замирания обоих пролетов суммируются, за исключением случаев совпадения замираний одинаковых элементов сигнала, что существенно ухудшает помехоустойчивость радиоприема.

Кроме того, переприем без компрессии не обеспечивает оптимизации загрузки транслирующего радиопередатчика, что также ведет к потере помехоустойчивости.

Таким образом, вариант сквозного переприема может использоваться только в тех случаях, когда используются каналы связи без быстрых замираний, т. е. в кабельных, радиорелейных или спутниковых системах связи.

Оба варианта одинаково чувствительны к рассинхронизации в канале связи. Поэтому необходима периодическая юстировка частот радиосредств (приемника и передатчика) в пункте переприема. Кроме того, в первом варианте следует юстировать генераторы управляющего канала. Следовательно, приемно-передающий комплект радиокомпандера должен содержать один общий стабильный генератор [11].

Поскольку оба рассмотренных варианта переприема имеют существенные недостатки, в каналах радиосвязи целесообразно использовать компромиссное решение, т. е. такое устройство переприема, которое должно обеспечить компрессию замирающих сиг-

налов и не вносить искажений, обусловленных управляемым экспандированием — компрессией сигналов в точке трансляции. Соответственно отпадает необходимость в демодуляции управляющего сигнала в пункте переприема и, следовательно, устраняются соответствующие искажения, возникающие при демодуляции — модуляции.

На рис. 3.11 показана структурная схема транслятора компандированных сигналов, подключенного к выходу радиоприемника *1*, в звуковом канале которого включены только фильтр *2* и регуля-

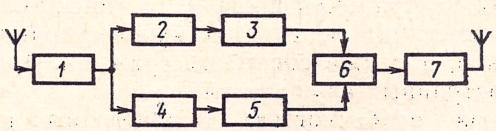


Рис. 3.11. Структурная схема транслятора компандированных сигналов

тор замираний *3*, а в управляющем — только фильтр *4* и ограничитель *5*. Выходы регулятора замираний *3* и ограничителя *5* подключены к линейному сумматору *6*, с выхода которого суммарный сигнал поступает на транслирующий передатчик *7*.

Рассмотрев схему, можно сделать вывод о том, что в пункте переприема целесообразно использовать типовой радиокомпандер, который должен иметь специальный режим «переприем» для соответствующей коммутации сигналов. При этом управляемый экспандер может использоваться только в качестве устройства слухового контроля первого пролета составного радиоканала.

Говоря о переприеме речевых сигналов, следует отметить, что при реализации дискретного радиокомпандера (который может быть выполнен при скорости передачи 4800 бит/с) возможна регенерация двоичных сигналов. Однако такое решение не является целесообразным с точки зрения повышения помехоустойчивости, поскольку наиболее эффективна ретрансляция при малом числе пролетов (два, три), а в этом случае аналоговый вариант радиокомпандера обеспечивает удовлетворительную помехоустойчивость за счет информационной избыточности самого речевого сигнала.

3.4. ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В РАДИОВЕЩАНИИ

Радиовещание в нашей стране развивается быстрыми темпами, располагает большими мощностями радиосредств и является самой массовой отраслью радио, которая обслуживает многомиллионную аудиторию в планетарном масштабе [78]. Только в нашей стране население имеет 60 млн. радиоприемников, что свидетельствует о важности совершенствования техники радиовещания и повышении качества обслуживания населения [78, 79].

Современное радиовещание обслуживает огромный парк радиоприемников. Считается, что к 1972 г. в мире эксплуатировалось до 20 000 коротковолновых радиопередатчиков и 800 000 000 приемников [80]. Центральное общесоюзное вещание ведется круглосуточно по всем программам в диапазонах длинных, средних, коротких и ультракоротких волн. В союзных и автономных республиках передачи ведутся на 67 национальных языках народов, населяющих Советский Союз. Непрерывно растет аудитория слушателей советского радиовещания во всех странах мира. В частности, пятая центральная программа (информационная и общественно-политическая) передается круглосуточно и предназначена для моряков, а также советских граждан, проживающих за границей, и иностранных слушателей.

Специфической особенностью технического проектирования систем радиовещания является усложнение и умощнение техники передачи сигналов по сравнению с массовыми средствами радиоприема. Так, для радиопередач вещательных программ используются мощные радиопередатчики (900—1000 кВт), работающие в однополосном режиме (при подаче программ вещания) или в режиме амплитудной модуляции (АМ).

Основной проблемой при компандировании вещательных сигналов является сохранение высококачественного звучания акустических программ. Поэтому использование нелинейных устройств в системах радиовещания и подачи программ вещания затрудняется.

Однако стремление сохранить высококачественные акустические показатели радиовещательных программ требует качественных каналов связи для подачи программ, которые не могут быть обеспечены без больших дополнительных энергетических и других затрат. Существующее противоречие привело к внедрению в радиовещательных трактах устройств компрессии динамического диапазона передаваемых сигналов. Особенно часто и эффективно такие устройства (ограничители) используются в трактах информационного вещания, где доля музыкальных, высокохудожественных передач невелика. Так, например, по данным японской корпорации NHK, которая ведет коротковолновое вещание на Японию и за границу на 23 языках, звуковой состав программ распределен так, что 60% времени отводится на новости и комментарии, 30% — на информацию и только 10% на музыку.

Огромные мощности радиовещательных станций (которые непрерывно увеличиваются) и грандиозность антенных систем делают задачу оптимизации загрузки радиопередатчиков актуальной.

Исследования показали [80], что включение компрессора модулирующих сигналов позволяет существенно повысить коэффициент модуляции и исключить ручную регулировку глубины модуляции. Временные характеристики вещательного компрессора выбираются из условий пропускания речевых и музыкальных сигналов — время нарастания менее 0,5 мс, время восстановления 0,5—2,5 с, а сжатие достигает 25 дБ для передатчиков вещания с АМ и 6 дБ для передатчиков подачи программ на ОБП, так как

присутствуют искажения, возникающие при однополосной работе. Для улучшения использования мощности передатчика сокращают пик-фактор информационных (речевых) программ путем включения в модулирующий тракт инерционных ограничителей, компрессоров и пиковых ограничителей. Экспериментальная оценка эффективности этих устройств показывает, что на радиолиниях информационного вещания протяженностью 1500—4000 км достигается существенное повышение слоговой разборчивости речи. При этом усредненная разница слоговой разборчивости составляет: для случаев сравнения необработанных сигналов с сигналами, подвергнутыми инерционному ограничению, 25%; с сигналами, подвергнутыми безынерционному ограничению, 13,1% [81].

Учитывая, что это повышение разборчивости речи достигается в условиях сильных радиопомех (артикуляция необработанного сигнала 52,2%) можно считать, что методы компрессии радиовещательных сигналов очень важны. Поэтому в трактах радиовещания включается последовательно несколько автоматических регуляторов уровня [82]. В микрофонной аппаратной включается компрессор, на выходе центральной аппаратной устанавливается ограничитель, в междугородном тракте подачи программ вещания по высокочастотным кабельным и радиорелейным системам используются компандеры и, наконец, на входе радиопередатчика включается ограничитель. Если учесть также, что часть регулирующих устройств должна отключаться во время перехода с речевой программы на музыкальную, то нетрудно понять, что качественные показатели трактов подачи программ вещания следует улучшать.

Применение управляемого компандирования в трактах подготовки и подачи программ вещания весьма актуально для исключения многокаскадного автономного регулирования усиления, исключения переключателей «речь — музыка» и повышение оперативности эксплуатации сетей вещания путем автоматизации и автоконтроля трактов.

Использование метода управляемого компандирования позволяет повысить качество подготовки радиовещательных программ. Так, для снижения уровня шумов при магнитной записи звуковой сигнал компрессируют и записывают его вместе с вспомогательным сигналом огибающей звука. При воспроизведении записи производится разделение звукового и вспомогательного сигнала и управляемое экспандирование звукового сигнала. Такой способ подготовки радиопрограмм позволяет автоматически поддерживать высокое отношение сигнал/шум при малых нелинейных искажениях [83].

Управляемое компандирование позволяет повысить эффективность систем подготовки, подачи и передачи программ вещания, т. е. на всех основных этапах формирования программ. Открываются также возможности повышения эффективности радиоприема вещательных программ. Во всех перечисленных случаях обеспечивается повышение помехоустойчивости радиовещания (качества радиоприема) или появляется возможность повышения других

техноэкономических показателей системы (стоимости радиосредств, емкости каналов подачи программ).

Рассмотрим, например, структурную схему подачи программ вещания (рис. 3.12) или звукового телевизионного тракта с применением управляемого компандирования в системе телевещания «Орбита» с использованием искусственных спутников земли [79].

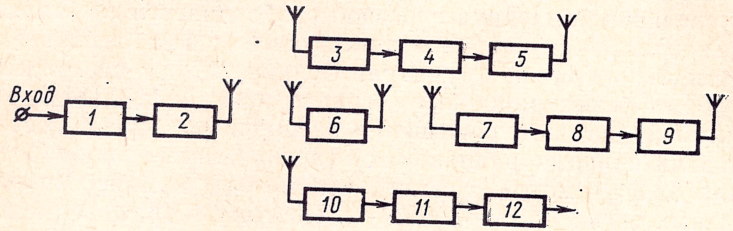


Рис. 3.12. Структурная схема подачи программ вещания с управляемым компандированием

В этой схеме управляемый компрессор *1* включается непосредственно в радиостудии и обеспечивает ввод в телевизионный тракт или в тракт подачи программы радиовещания двухканальный сигнал — звуковой сигнал постоянного уровня и управляющий сигнал в специально выделенной полосе частот звукового канала. В общем спектре модулирующего сигнала эти сигналы поступают на земную телевизионную передающую станцию *2*, а затем излучаются в космос. Ретрансляционная радиостанция спутника связи осуществляет прием и передачу сигналов на наземные приемники (блоки *3, 6, 7, 10*). В соответствии с тремя вариантами подачи программ на рис. 3.12 показаны различные тракты и точки включения управляемых экспандеров. В случае подачи программы непосредственно на земную радиовещательную станцию экспандер *4* включается между выходом приемника *3* и входом передатчика *5*. В тех случаях, когда программа подается с приемных станций к местным радиостанциям через радиорелейные линии, экспандер *8* включается между выходом приемника оконечной радиорелейной станции (или кабельной магистрали) и входом радиовещательного передатчика *9*. В случае подачи программ к системам проводного вещания управляемый экспандер *10* включается между выходом радиоприемника *10* и входом радиотрансляционного узла *12*.

Наиболее важным результатом применения метода управляемого компандирования в космической системе радиовещания можно считать эффект повышения помехоустойчивости, достигаемый без наращивания мощности бортового передатчика спутника связи.

Увеличение эквивалентной мощности наземных радиопередатчиков в трактах подачи программ также остается актуальной задачей в связи с энергетическими затратами на умощнение передатчиков и возрастанием общего уровня помех. В тех случаях, когда программа подается по коротковолновым радиоканалам, од-

нополосные радиопередатчики работают в линейном режиме. Линейное усиление обеспечивают и мощные радиовещательные станции с амплитудной модуляцией, обслуживающие удаленные или малонаселенные территории. Поэтому разработка методов повышения КПД мощных радиопередатчиков имеет важнейшее значение. Простейшим решением задачи является компрессия модулирующих сигналов, что позволяет повысить качество (разборчивость) информационного вещания в условиях помех. Устройство компрессии (рис. 3.13) состоит из последовательно включенных

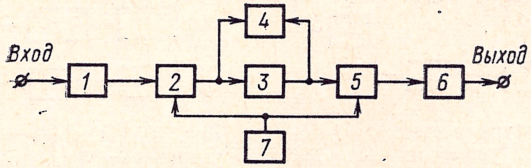


Рис. 3.13. Структурная схема ограничителя динамического диапазона уровней сигналов

входного фильтра *1*, однополосного модулятора *2*, ограничителя амплитуд *3* с блокиратором *4*, демодулятора *5* и выходного фильтра *6*. Модулятор *2* и демодулятор *5* работают от общего генератора *7*. Этот компрессор — ограничитель динамического диапазона уровней [84] — включается при трансляции сигналов магнитной записи, причем на заранее подготовленной дополнительной магнитной дорожке фиксируется время передач речевых и музыкальных программ. Соответствующие сигналы управления вводятся в тракт и изменяют режим работы компрессора, ограничивая однополосные сигналы только при передаче речи и подавляя шум в паузах между словами. При передаче музыки блокиратор *4* исключает ограничитель *3* из тракта, причем время коммутации не превышает 10 мс.

Общий недостаток вещательных компрессоров, ограничителей (лимиттеров) и шумоподавляющих устройств, включаемых в модулирующем тракте радиопередатчика, в том, что режим работы мощных каскадов не изменяется и остается линейным.

Существенного повышения КПД мощного однополосного передатчика (по промежуточным каскадам) в сочетании с обеспечением постоянства коэффициента усиления в диапазоне частот можно достичь, применив способ, основанный на раздельном усилении огибающей и частотно-модулированной составляющей однополосного сигнала [13, 85]. При этом однополосный сигнал, сформированный на рабочей частоте и малой мощности, детектируется в тракте управления и ограничивается по амплитуде в звуковом тракте. Затем производится раздельное усиление частотной и амплитудной составляющих звукового сигнала и их последующее перемножение с целью синтеза однополосного сигнала излучения. Соответствующая структурная схема однополосного передатчика с раздельным усилением составляющих звуков показана на рис.

3.14. Звуковой сигнал поступает на модулятор однополосного сигнала *1* и затем частотная и амплитудная составляющие однополосного сигнала разветвляются. В звуковом тракте последовательно включены ограничитель *2* и усилитель *3* (промежуточные каскады мощного передатчика), а в управляющем тракте последова-

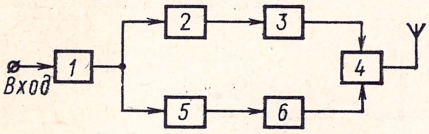


Рис. 3.14. Структурная схема устройства раздельного усиления сигналов

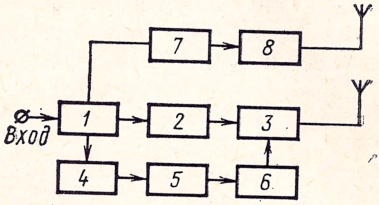


Рис. 3.15 Структурная схема устройства раздельного излучения сигналов

тельно включены амплитудный детектор *5* и усилитель постоянного тока *6*. Раздельно усиленные сигналы вводятся в мощный каскад *4*, выполненный по балансной схеме.

Таким образом, промежуточные каскады передатчика *3* работают в перенапряженном режиме в классе С, что приводит не только к увеличению КПД, но и к уменьшению тока покоя мощных радиоламп.

При передаче программ вещания может использоваться и раздельное излучение составляющих радиосигнала. В этом случае [86] способ передачи звуковых сигналов с раздельным излучением несущей и боковых частот автономными антеннами заключается в том, что сигналами звуковой огибающей управляют напряжением выпрямителя, питающего выходной усилитель амплитудно-ограниченных однополосных сигналов.

Способ раздельного излучения иллюстрируется структурной схемой (рис. 3.15), на которой показаны два тракта излучения — тракт излучения сигналов (блоки *1—6*) и тракт излучения несущей частоты (блоки *7—8*).

На вход однополосного модулятора *1* подаются модулирующие звуковые сигналы. Далее однополосные сигналы с подавленной несущей выравниваются по амплитуде ограничителем *2* и поступают в мощный усилитель *3*. Одновременно огибающая звуков выделяется амплитудным детектором *4*, сглаживается фильтром *5* и подается на управляемый выпрямитель *6*, питающий анодные цепи ламп мощного высокочастотного усилителя *3*. Поскольку усилитель *3* работает в перенапряженном режиме, на его выходе получаются однополосные радиосигналы с восставленной и сглаженной огибающей звуков, которые излучаются антенной. Тракт формирования и излучения несущей частоты состоит из генераторов несущей *7* и мощного усилителя *8*, подключаемого к антенне.

Таким образом, оба мощных высокочастотных усилителя *3* и *8* работают с наибольшим КПД по анодной цепи на протяжении

всего цикла модуляции в перенапряженном режиме. В результате обеспечивается высокое использование мощности радиоламп усилителя *3*, работающего в режиме анодной модуляции и отдающего на пиках модуляции мощность, бо́льшую номинальной мощности его ламп.

Применение способа раздельного излучения несущей и боковых частот при работе передатчиков несущей и боковых в перенапряженном режиме класса С позволяет получить необходимый эффект при уменьшении установленной мощности радиоламп и уменьшении потребляемой электроэнергии или, что важнее, увеличить эквивалентную мощность излучения. Кроме того, на коротких волнах раздельное излучение несущей и боковых частот позволяет, не превосходя критических, по условиям распространения, размеров антенны, получить выигрыш в мощности принимаемого сигнала путем увеличения общего фронта антенн передатчика.

Однако умощнение радиопередающих средств еще не решает всех проблем проектирования систем радиовещания. Современные системы радиовещания в длинноволновом, средневолновом и коротковолновом диапазонах частот базируются на технике амплитудной модуляции и приемники радиослушателей рассчитаны на прием радиопередач в этих диапазонах. В связи с перегрузкой вещательных диапазонов наблюдаются радиопомехи, помехи от промышленных электроустановок, а также помехи от транспортных средств. Кроме того, качество радиовещательных передач страдает от замираний и интерференционных искажений сигналов в среде распространения. Поэтому повышение помехоустойчивости радиоприема вещания остается важной и актуальной проблемой.

В улучшении качества приема радиовещания в первую очередь нуждаются удаленные радиослушатели, использующие радиоприемники коллективного пользования — зарубежные организации (посольства, торгпредства, экипажи подвижных средств, общества дружбы с СССР и т. д.), а также радиослушатели в районах с повышенным уровнем индустриальных или преднамеренных радиопомех.

Метод управляемого компандирования позволяет повысить качество радиовещательного приема.

Особенностью применения управляемого компандирования в радиовещании является необходимость сохранения неизменным парка бытовых радиоприемников, находящихся в эксплуатации.

Следовательно, задача сводится к разработке совместимой системы радиовещания, при которой возможна эксплуатация парка радиоприемников с существующим качеством радиоприема и может быть повышено качество радиоприема у радиослушателей, использующих дополнительное оборудование, реализующее преимущества метода управляемого компандирования. Дополнительная приставка должна подключаться к стандартному радиоприемнику тех радиослушателей, которые нуждаются в улучшении качества радиовещания.

Естественно, что управляющий сигнал, необходимый для реализации совместимой системы радиовещания, должен транслироваться с радиопередатчика в составе стандартного амплитудно-модулированного сигнала, причем так, чтобы исключить его заметность в стандартных радиоприемниках. Это требование может быть выполнено при узкополосной модуляции несущей частоты АМ передатчика. Для передачи информации об изменениях огибающей амплитуд вещательных сигналов достаточно транслировать на прием сигналы, скорость нарастания которых не превышает средней постоянной времени человеческого слуха (до 20 мс). Следовательно, для дополнительной ЧМ несущей передатчика достаточна полоса 40 Гц. Применяя помехоустойчивые методы модуляции — частотную или фазовую модуляцию, следует предусмотреть соответствующее расширение полосы «управляющего» подканала, однако только до предела заметности управляющих сигналов на слух в стандартном приемнике.

Итак, цель создания совместимой системы радиовещания заключается в повышении помехоустойчивости радиоприема у радиослушателей, имеющих приставки к стандартным радиоприемникам, и сохранении качества радиовещания неизменным у радиослушателей, не имеющих соответствующих приставок. Эта цель достигается введением дополнительных блоков управления колебаниями в радиовещательный АМ передатчик, а также дополнением стандартного радиоприемника управляемым регулятором уровня.

Совместимая система радиовещания может быть реализована в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 3.16, в состав которой входят передающее и приемное устройства.

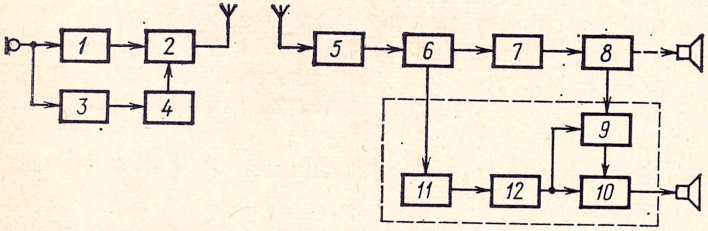


Рис. 3.16. Совместимая система радиовещания

Передающее устройство содержит блок задержки *1*, передатчик *2*, детектор огибающей *3* и управляемый генератор *4* несущей частоты.

Приемное устройство содержит последовательно включенные стандартные блоки-усилители высокой частоты *5*, усилитель промежуточной частоты *6*, детектор *7* и усилитель низкой частоты *8*, а также дополнительные блоки — управляемый компрессор *9* и управляемый экспандер *10*, к цепям управления которых подключены блоки формирования управляющего сигнала — фильтр *11* и демодулятор огибающей *12*.

На вход передающего устройства поступает вещательная программа, сигналы которой задерживаются во времени в связи с запаздыванием сигналов управления, транслирующихся в узкополосном тракте на передаче и на приеме. (Чтобы упростить приемники, введение задержки звуковых сигналов производится только на передаче). С выхода блока задержки *1* звуковые электросигналы подаются на модулятор АМ передатчика *2*. Входные сигналы поступают также на детектор огибающей *3*, в котором формируются управляющие сигналы, необходимые для управления процессом экспандирования на приеме. Управляющие сигналы вводятся в генератор несущей *4*, обеспечивая изменение частоты (фазы) в пределах, необходимых и допустимых для трансляции управляющего сигнала в спектре АМ сигнала передатчика *2*. Компрессия звуковых сигналов радиопередатчика допустима лишь в пределах, оговоренных правилами действующей системы радиовещания, и в данном случае не изменяется.

Радиоприемное устройство функционирует, обеспечивая стандартный тракт радиовещательного приема (блоки *5—8*), так как заметность управляющих сигналов на слух исключается фильтрацией на промежуточной частоте блока *6*, что позволяет прослушивать вещательную программу с выхода УНЧ, как обычно. Однако для слушателей, имеющих приставку повышения качества — радиокомпандер, звуковой сигнал подлежит дальнейшей обработке и подается в компрессор *9*, где сжимается по динамическому диапазону до постоянного уровня.

Поскольку в процессе компрессирования наряду с сжатием диапазона разброса амплитуд, возникающего вследствие быстрых замираний, сжимается также и информационный диапазон звуков, необходимо экспандирование. В связи с тем, что на вход экспандера *10* поступает звуковой сигнал с уровнем, близким к постоянному, то оказывается возможным исключить усиление деформации остаточного затухания линии экспандером. Для управления компрессором и экспандером необходим управляющий сигнал. Этот сигнал выделяется фильтром *11* из высокочастотного сигнала путем гетеродинирования несущей частоты (используется гетеродин стандартного приемника). Ограниченное по полосе и уровню напряжение управления демодулируется и с выхода демодулятора *12* поступает на управляющий вход экспандера *10*. Таким образом, с выхода экспандера можно прослушивать вещательную программу в условиях подавления замираний, помех, шумов, т. е. осуществлять помехоустойчивый прием радиовещания, что эквивалентно существенному повышению мощности радиопередатчика.

Область применения вещательных радиокомпандеров расширяется в условиях, когда мощность радиопередатчика невозможно или нецелесообразно увеличивать, например в условиях удаления рассредоточенных радиослушателей.

Возможны разные формы выполнения системы с различными модемами передачи управляющего сигнала (аналоговыми или дискретными). Возможны также разные способы излучения управляющих сигналов, например раздельное излучение, при котором несущая частота, модулированная узкополосным сигналом управления, излучается в полосе до 300 Гц на фиксированной радиочастоте отдельным радиопередатчиком. Временна́я диаграмма, иллюстрирующая работу помехоустойчивой системы радиовещания, показана на рис. 3.17. Звуковой сигнал, излучаемый передатчиком, изображен на рис. 3.17*а*, а звуковая огибающая на рис. 3.17*б*. Как видно из сопоставления обоих сигналов, они смещены во времени так, что звуковой сигнал задержан на время t_3, равное времени запаздывания огибающей в тракте передачи и приема.

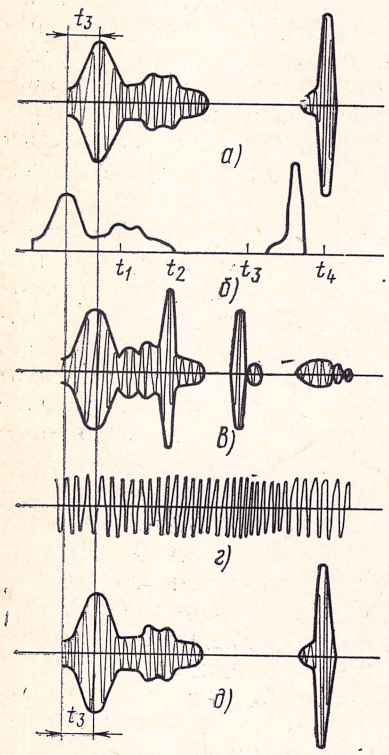


Рис. 3.17. Временна́я диаграмма совместимой системы

Принимаемый радиосигнал поступает с выхода радиоприемника с искажениями огибающей, причем наблюдается как возрастание его уровня (точки t_1, t_2) и помехи в паузе (t_3), так и замирания (t_4). Следовательно, в моменты времени $t_1 \div t_4$ сигнал не соответствует переданному (рис. 3.17*а*). Искаженный сигнал поступает на вход управляемого компрессора, с выхода которого следует сигнал постоянного уровня (рис. 3.17*г*). Управляемый компрессор увеличивает отношение сигнал/помеха, поскольку его усиление не зависит от уровня входного сигнала (моменты t_1, t_2, t_3) и компенсирует замирание (момент t_4). Управляемый экспандер восстанавливает исходную форму огибающей звукового сигнала без деформации динамичного диапазона звуков (рис. 3.17*д*) только в том случае, если закон компрессии и экспандирования остается одинаковым, а амплитуда входных сигналов экспандера постоянна. Поэтому параметры компрессора должны выбираться с учетом указанных условий.

Соответственно выигрыш в помехоустойчивости зависит от выполнения этих условий, а также от статистики помех на входе экспандера. Количественные значения амплитудно-временны́х параметров системы различаются в зависимости от требуемого качества воспроизведения звуков. Так, если динамический диапазон сжатия огибающей звуков может превышать $D = 30—40$ дБ

(например, разница в интенсивности звучания фрагментов театральной передачи — от самого громкого звука ближайшего к микрофону исполнителя или инструмента до самого тихого звука наиболее удаленного от микрофона исполнителя), то с учетом замираний в радиоканале диапазон изменения уровней может достигать 60 дБ.

Постоянная времени детектора огибающей составляет $\tau_0 = RC \geqslant 10$ мс.

Соответственно время задержки $\tau_з = 2\tau_0 \leqslant 20$ мс. (С учетом задержки сигналов в тракте демодуляции и управления на приеме). Следовательно, скорость модуляции $V = \frac{1}{2\pi\tau_0} \leqslant 15$ Гц. Определив значение V и зная допустимую девиацию частоты ΔF (например, 0—100 Гц в системе АМ радиовещания с полосой приемника 200÷6000 Гц), следует оценить допустимый индекс модуляции $m = \frac{\Delta F}{V} \geqslant 16$. Такой индекс позволяет обеспечить помехоустойчивую передачу сигналов звуковой огибающей.

Принимая изменение частоты 2 Гц на 1 дБ изменения уровня огибающей (по Рекомендации МККР № 455), можно гарантировать авторегулирование динамического диапазона уровней воспроизводимой вещательной передачи в пределах $D = \Delta F/2 \leqslant 100$ дБ. С учетом потерь полосы частот на расфильтровку звуковых (выше 200 Гц) и управляющих (ниже 100 Гц) сигналов следует ограничить значение D пределами 30—50 дБ, т. е. рабочая девиация частоты $\Delta F \leqslant 60$—100 Гц.

Частота управления должна изменяться пропорционально уровню огибающей, т. е. в паузах частотные отклонения несущей отсутствуют.

Основным требованием в системе является незаметность ЧМ сигналов слушателями стандартных приемников, которая обеспечивается выполнением условия $\Delta F < F_з$ (где $F_з$ — порог звуковой полосы, $F_з = 100$ Гц) и условия $F_з + \Delta F \leqslant \Delta F_{пч}$ (где $\Delta F_{пч}$ — полоса фильтра промежуточной частоты стандартного радиоприемника). Выполнение условия $\Delta F < F_з$ исключает попадание ЧМ сигнала в полосу фильтра промежуточной частоты приемника, а выполнение условия $F_з + \Delta F \leqslant \Delta F_{пч}$ предотвращает потери высших звуковых частот при максимальных частотных отклонениях. Следует также подчеркнуть, что незаметность частотномодулированного сигнала на слух обеспечивается за счет амплитудного детектирования вещательных сигналов, при котором отклонение высокой частоты на величину ΔF оказывается пренебрежимо малым.

Управляющий сигнал выделяется низкочастотным фильтром (полоса 0—100 Гц), подключенным к выходу преобразователя частоты приемника, ограничивается по амплитуде в диапазоне селективных замираний ($D \leqslant 30$—40 дБ) и подается на частотный демодулятор.

Повышение помехоустойчивости и качества радиоприема достигается тем, что динамика изменений звуковой огибающей воспроизводимой вещательной программы определяется не широкополосным трактом распространения, в котором действуют шумы, помехи и замирания, а принятым по узкополосному каналу управления частотномодулированным помехоустойчивым сигналом звуковой огибающей.

Возможная схема радиоприемника звукового вещания, обеспечивающего помехоустойчивый режим (рис. 3.18), содержит все

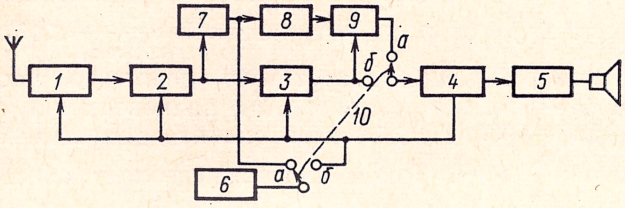


Рис. 3.18. Структурная схема радиоприемника совместимой системы

блоки стандартного радиоприемника: УВЧ — *1*, преобразователь — *2*, УПЧ — *3*, охваченные цепью АРУ, амплитудный детектор — *4*, УНЧ — *5* и индикатор настройки — *6*. Для выделения управляющих сигналов введены полосовой фильтр *7* и частотный демодулятор *8*, который содержит ограничитель амплитуд и частотный детектор, а также управляемый регулятор уровней *9*, сигнальный вход которого связан с выходом усилителя промежуточной частоты *3*, а выход подключен ко входу УНЧ *5*. Выход фильтра *7* связан с индикатором настройки *6*. Указанные выше соединения, обеспечивающие помехоустойчивый режим принятых радиосигналов, выполняются в положении *а* переключателя режимов *10*. В положении *б* обеспечивается стандартный режим радиоприема [17].

В помехоустойчивом режиме управляющий частотномодулированный сигнал входит в состав излучаемого радиовещательным передатчиком сигнала, располагаясь вне полосы звукового сигнала, и выделяется фильтром *7*, выходные сигналы которого поступают на демодулятор *8*, а также на индикатор настройки *6*, который обеспечивает повышенную точность настройки на радиостанцию при управлении узкополосным сигналом постоянного уровня.

Обычно система АРУ в радиоприемниках может компенсировать только медленные замирания, поскольку постоянная времени АРУ выбирается так, чтобы исключить возможность демодуляции звуковых сигналов, т. е. $\tau_{АРУ} \geqslant \tau_{зв}$ (где $\tau_{зв}$ — наиболее длительный звук). Использование для регулирования уровня сигнала огибающей звуков позволяет обеспечить быструю регулировку уровней, независимо от причины изменения ампли-

туды принятых сигналов: программа вещания, быстрые или медленные замирания, станционная помеха, промышленная, импульсная помеха и т. д. Сигналы промежуточной частоты постоянного уровня подаются на управляемый регулятор *9*, который восстанавливает динамику огибающей только по закону звукового сигнала, не реагируя на деформации огибающей, вызванные помехами и замираниями в тракте вещания (помехи в управляющем канале по сравнению с помехами в звуковом канале пренебрежимо малы ввиду узкой полосы канала и помехоустойчивого вида модуляции — ЧМ). Регулированные сигналы промежуточной частоты поступают на амплитудный детектор *4* стандартного приемника и далее на УНЧ с громкоговорителем *5*.

Последовательная медленная и быстрая регулировка уровней принятых радиосигналов при управлении сигналами звуковой огибающей исключает искажения динамического диапазона звуков воспроизводимой вещательной программы, а индикация настройки по управляющему сигналу повышает точность настройки. Поэтому повышение качества воспроизводимой вещательной программы в радиоприемнике с компандированием достигается за счет ослабления прослушивания станционных помех и быстрых замираний; подавления шумов и помех в паузах; исключения деформации огибающей звуков.

3.5. ОДНОВРЕМЕННАЯ ПЕРЕДАЧА РЕЧИ И ДАННЫХ В АСУ

При организации связи для сбора и доставки данных в автоматизированных системах управления (АСУ) возникает задача передачи двоичных сигналов по эксплуатирующимся каналам телефонной связи. Существует также задача уплотнения телефонных каналов связи телеграфными каналами. Эти задачи могут решаться как путем создания автономных каналов передачи дискретных сигналов в сети телефонной связи, так и путем уплотнения речевых сигналов дискретными. В первом случае в полосе телефонного канала выделяется область спектра для организации телеграфного канала или канала передачи данных, а во втором необходимо обеспечить совместную поочередную передачу речевых и дискретных сигналов в спектре полного телефонного канала (0,3—3,4 кГц).

Поскольку в настоящее время отсутствует типовая аппаратура для одновременной передачи речи и данных в телефонном канале, следует рассмотреть методы и средства уплотнения канала тональных частот. Естественно, что наиболее актуальна подобная задача для малоканальных средств связи, где нецелесообразно выделять полный телефонный канал для передачи данных. К таким системам можно отнести, например, магистральные однополосные радиоканалы коротковолновой связи, которые соединяют столицу с республиканскими и областными

центрами страны, где обычно располагаются вычислительные центры [28, 29, 109].

Специфические свойства информации АСУ позволяют использовать магистральную радиосвязь в качестве мобильной сети доставки информации с областных вычислительных центров на республиканские или на главный вычислительный центр. К особенностям данного вида информации ОАСУ относятся:

— периодичность отправки данных, определяемая ритмом решения управленческих задач;

— симплексный характер потока информации, направленного «снизу вверх»;

— «технологический» характер информации, отражающей ведомственную отчетность, обработанную на вычислительных центрах, которая может передаваться открыто;

— объемы передаваемой управленческой информации, как правило, невелики и могут передаваться со скоростью 50—200 Бод несколькими сеансами в сутки.

Однако относительно небольшое повышение пропускной способности существенно повышает технологические показатели малоканальных радиолиний, ибо не требуется вводить новые мощности, средства, выделять радиочастоты, например для раздельных телефонного и телеграфного каналов [65]. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что организация дополнительного телеграфного подканала в телефонном радиоканале не сопряжена с трудностями, которые существуют при уплотнении коммутируемых телефонных каналов дальней связи дискретными сигналами [87]. Так, в радиоканалах отсутствует проблема предотвращения перекрестных помех сигналов речи и данных, ибо радиотракт является четырехпроводным и состоит, по существу, из двух независимых симплексных каналов связи. Фактически отсутствует и проблема перегрузки группового оборудования, возникающая в дальней связи при уплотнении пауз речи.

К тому же в последние годы на магистральных однополосных радиолиниях внедрены современные радиотелефонные модемы, обеспечивающие управляемое компандирование речевых сигналов, подавление эхо-сигналов в радиолиниях и сопряжение радиолиний с каналами междугородной телефонной связи [11, 60].

Таким образом, действующая сеть магистральной радиосвязи может использоваться для доставки информации ОАСУ «снизу вверх». Другим примером необходимости совмещать передачу речевых и дискретных сигналов при организации связи в АСУ служит система сбора данных на уровне предприятий, поскольку для технологической и бытовой связи здесь используются лишь телефонные каналы связи, а поочередная передача только речевых сигналов или только данных далеко не всегда удобна.

В телефонном канале связи имеются существенные резервы пропускной способности, поскольку он даже в режиме разговора

используется всего на 30%, так как люди говорят поочередно, а в речи имеются паузы.

Таким образом, задача одновременной передачи речевых и дискретных сигналов актуальна в первую очередь там, где речевой канал является основным и дорогим каналом связи. Впрочем, данная задача является общетехнической, она актуальна в космической радиосвязи, в человеко-машинных системах и т. п.

Задача должна решаться с учетом перспективной техники телефонирования, разработанной для упомянутых телефонных систем, действующих, как правило, в условиях повышенных помех. Такой помехоустойчивой системой телефонирования является управляемый компандер [63]. Вот почему задача сводится к разработке способов и устройств передачи дискретных сигналов в системе с управляемым компандированием речевых сигналов.

Следует различать методы «параллельной» и «последовательной» передачи речевых и дискретных сигналов.

При параллельной передаче сигналы передаются автономно — каждый в своей полосе частот, а при последовательной передаче данных передаются в паузах речи. Соответственно возможен и параллельно-последовательный вариант, при котором непрерывно функционирует параллельный канал передачи данных (телеграфный подканал), резко увеличивающий свою пропускную способность во время пауз речи.

Структурная схема радиокомпандера с модемом передачи данных показана на рис. 3.19. Дифференциальный трансформатор *1* сопрягает вход и выход радиокомпандера с абонентской двухпроводной телефонной линией связи или с каналом междугородной связи.

Тракт передачи начинается с фильтра ТЧ канала *2,* с которого сигналы разветвляются в речевой и управляющий подканалы. В речевом подканале сигнал с динамическим диапазоном 60 дБ через блок задержки *3* поступает на управляемый компрессор *4*. Компрессированный до постоянного уровня речевой сигнал через блок задержки *5* и полосовой фильтр *2* (0,3—2,7 кГц) подается на линейный сумматор *7*. Управляющий сигнал формируется амплитудным детектором *8* и подается на компрессор *4,* а также на частотный модулятор *9,* который обеспечивает линейную модуляционную характеристику с изменением ±2 Гц/дБ. Выходной сигнал сумматора *7* подается к модулирующему входу радиопередатчика по соединительной линии. Соответственно с выхода радиоприемника сигналы подаются на усилитель *10* и далее расфильтровываются на фильтрах речевого *11* (0,3—2,7 кГц) и управляющего *15* (2.7—3,0 кГц) подканалов. Отфильтрованные сигналы речевого подканала компрессируются по амплитуде регулятором замираний *12* (диапазон от +7 до —35 дБ, постоянная времени 11—32 мс). Далее речевой сигнал поступает на блок задержки *13,* который как и блок *5,* предназначен для временно́го согласования речевых и управляющих сигналов на входах управляемого экспандера *14*. На выходе экс-

пандера восстанавливается динамический диапазон речи — 60 дБ. В подканале управления на приеме последовательно включены ограничитель *16* и частотный детектор *17*. В данном случае структурная схема радиокомпандера необходима лишь для того, чтобы показать цепи подключения эхо-заградителя *18*, а также блоков ввода и вывода данных (*19*, *20*).

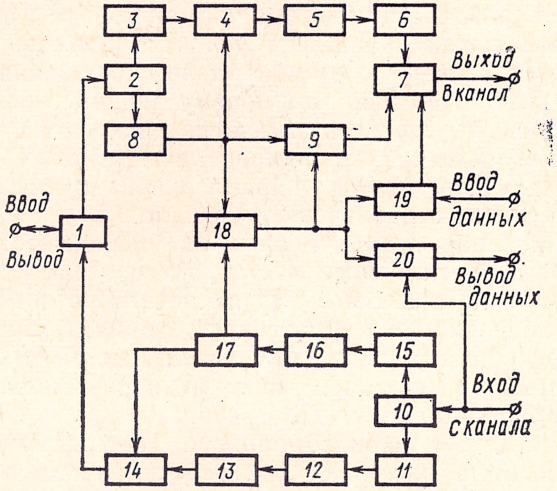


Рис. 3.19. Структурная схема телефонно-телеграфного модема

Эхо-заградитель включен так [60], чтобы при преобладании амплитуды огибающей речи на приеме пункта А ($U_{пр}$) над величиной огибающей речи на передаче ($U_{пер}$) того же пункта запереть (по управлению) экспандер пункта Б путем принудительной установки частоты «молчания» в частотном модуляторе *9*. Следовательно, эхо-заградитель может являться коммутатором «речь — данные» в случае передачи дискретных сигналов в паузах речи. Соответственно алгоритм работы эхо-заградителя: ($U_{перА} > U_{прА}$) ($U_{эБ} = var$) $\sim$ ($U_{дБ} = 0$) или ($U_{перА} < U_{прА}$) $\sim$ $\sim$ ($U_{эБ} = 0$) $\sim$ ($U_{дБ} = U_{макс}$), где $U_{э}$ — выходное напряжение экспандера; $U_{дБ}$ — напряжение сигнала данных (телеграфа).

Итак, эхо-заградитель *8* радиокомпандера [63] обеспечивает одновременную передачу речи в направлении А—Б и данных в направлении Б—А. Важно отметить, что в качестве коммутатора «речь — данные» можно использовать не любой эхо-заградитель, а только такой [60], который оперирует с управляющими сигналами радиокомпандера.

Передача данных в паузах речи сопряжена с усложнением оконечного оборудования, приспособленного к режиму преры-

вистой связи. Параллельный же метод передачи дискретных сигналов значительно проще.

Действительно, достаточно организовать в полосе 3,0—3,4 кГц частотный канал на поднесущей 3,2 кГц, чтобы получить непрерывно действующую дуплексную линию связи для телеграфа или передачи данных.

Следовательно, блоки ввода и вывода данных должны содержать модем, действующий в полосе $\Delta F_д = 400$ Гц. Выбирать вид модуляции для этого модема следует с учетом свойств радиоканала и условий функционирования телефонно-телеграфного модема как единого комплекса.

Простейшим режимом является применение типового канального модема системы тонального телеграфирования с частотной манипуляцией, параметры которого регламентированы МККР: при скорости манипуляции $V_м = 200$ Бод отклонение частоты ± 170 Гц. Соответственно дополнительное увеличение пропускной способности ТЧ канала с учетом передачи данных в паузах речи пропорционально отношению полосы ТЧ канала $\Delta F_{тч}$ к полосе частотного подканала данных $\Delta F_д$

$$c = \kappa \left(\frac{\Delta F_{тч}}{\Delta F_д} - 1 \right),$$

где κ — коэффициент уплотнения ТЧ канала данными, определяемый отношением времени передачи речи T к времени занятия ТЧ канала $T_{тч}$: $\kappa = T/T_{тч} \geqslant 0{,}5$. (Значение $\kappa = 0{,}5$ выполняется, когда активное время разговора в дуплексном канале поровну разделено между собеседниками. В условиях молчания обоих собеседников $\kappa_{макс} = 1$).

Таким образом, скорость передачи дискретных сигналов в занятом ТЧ канале может составить V бод:

$$V = V_м \left[\kappa \left(\frac{\Delta F_{тч}}{\Delta F_д} - 1 \right) + 1 \right].$$

Для случая частотной манипуляции $V = 850$ Бод. Однако выбор частотной манипуляции является простым, но не оптимальным решением.

Дело в том, что рассинхронизация, существующая в радиоканале (или наличие Допплер-эффекта) вредно влияет на помехоустойчивость частотных демодуляторов управляющего канала в радиокомпандере и в узкополосном канале тонального телеграфа. Действительно, поскольку нестабильность радиочастоты переносится на поднесущие частоты телефонно-телеграфного модема, сигналы управления и тонального телеграфа недопустимо искажаются. Так, например, при взаимной нестабильности радиосредств (передатчика и приемника) величиной $2 \cdot 10^{-6}$ на частоте 30 МГц, рассинхронизация на поднесущих частотах составит 60 Гц, т. е. соответственно 50 и 30% девиации управляющего и телеграфного подканалов, что явно недопустимо.

В условиях рассинхронизации на поднесущих частотах искажается форма огибающей речи в радиокомпандере, а в телеграфном УМ канале появляются односторонние временные искажения детектированных сигналов, которые ведут к групповым ошибкам. Следовательно, выбор частотной манипуляции для модема передачи данных неоптимален. Наоборот, при выборе метода фазовой манипуляции в телеграфном подканале появляется возможность ликвидации вредных последствий рассинхронизации для радиокомпандера.

Действительно, при наличии немодулированной по частоте поднесущей $f_т$ (фазовая манипуляция снимается удвоением частоты) возникает возможность выполнить частотное детектирование управляющих сигналов частоты $f_у$ относительно этой опорной поднесущей, т. е. частотная девиация $\Delta F_у = f_т - f_у$, так как $f_т > f_у$.

Поскольку рассинхронизация в радиоканале Δf одинакова для поднесущих управляющего ($f_у$) и телеграфного подканалов $f_т$, то девиация частоты канала управления не зависит от рассинхронизации:

$$\Delta F_y = (f_т \pm \Delta f) - (f_y \pm \Delta f) = f_т - f_у.$$

Другим преимуществом фазовой манипуляции перед частотной в условиях передачи сигналов в радиоканалах является то, что при эквивалентной помехоустойчивости обеспечивается бо́льшая пропускная способность C, пропорциональная краткости манипуляции $м$: $C = м C_д (c+1)$, где $C_д$ — пропускная способность телеграфного канала (бит/с). Так, например, при двухкратной фазовой манипуляции ($м=2$) и $к=0{,}5$ пропускная способность может составить в среднем 1800 бит/с.

Важно подчеркнуть, что телефонно-телеграфный модем с дополнительным фазовым подканалом передачи данных в полосе 3,0—3,4 кГц не исключает совместимости приемника радиокомпандера (с относительным частотным детектором) с существующими радиокомпандерами, например с системой «Линкомпекс», поскольку сигналы в полосе 0,3—3,0 кГц не подвергаются изменениям.

Поскольку управляющие сигналы радиокомпандера передаются методом частотной модуляции с регламентированным МККР [8] отклонением частоты управления $f_у = 2980 — 120$ Гц, то необходимо так выбрать частоту параллельного телеграфного канала $f_т$, чтобы она могла быть получена совместно с частотой $f_у$ от единого стабильного генератора. В свою очередь, формирование частот $f_у$ и $f_т$ от единого генератора обеспечивает возможность помехоустойчивого детектирования.

Анализ схемы спаренного частотно-фазового модулятора-манипулятора позволяет рассчитать основные параметры модема. Функциональная схема частотно-фазового модулятора-манипулятора и соответственно демодулятора представлена на рис. 3.20. Здесь на *Вход 1* подаются речевые сигналы, а на *Вход 2* — дис-

кретные (телеграфные сигналы или данные в виде синхронной последовательности видеоимпульсов со скоростью в 200 Бод). Речевые сигналы через тракт компрессии *1* подводятся к выходному линейному сумматору *2*, а к двум его входам подключены выходы цепей формирования частотномодулированных и фазоманипулированных сигналов.

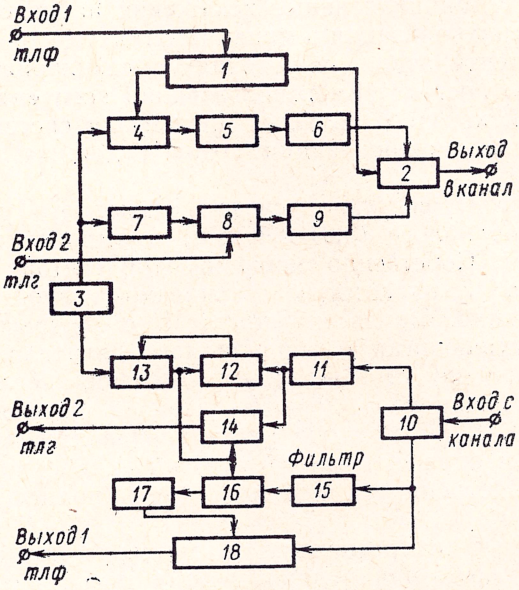


Рис. 3.20. Структурная схема телефонно-телеграфного модема

Указанные сигналы формируются от кварцевого генератора *3*, частота которого $f_г$ в n раз выше частоты «молчания» (2980 Гц), причем значение n выбирается из условий необходимой точности изменения частоты. Соответственно нижняя частота управления («максимальная громкость») достигается при соблюдении условия $f_г = n(f_у - \delta F)$, где $\delta F_у$ — наибольшее отклонение частоты. Следовательно, верхняя частота $f_у = f_г/n + \delta F$. Итак, применив делитель частоты с коэффициентом деления n и исключая δF импульсов в секунду, можно обеспечить дискретную частотную модуляцию «вниз» от значения $f_у = 2980$ Гц на 120 Гц.

Цепь дискретной модуляции содержит управитель *4* (вычитатель импульсов, подключенный к управляющему выходу тракта компрессии речи *1*), делитель *5* и полосовой фильтр *6* (2,7—3,0 кГц).

Параллельный тракт фазового манипулятора содержит последовательно включенные делитель частоты *7* (с коэффициентом деления $n = f_г/f_т - 2^{м+1}$ где $м$ — краткость манипуляции), управи-

тель *8*, содержащий $м+1$ двоичных ячеек деления и фильтр *9* (3,0—3,4 кГц). Следует отметить, что введение в состав управителя *8* дополнительной ячейки $(м+1)$ сверх краткости $м$ обусловлено целесообразностью применения регулярной (вспомогательной) фазовой манипуляции со скоростью манипуляции, независимо от процесса информационной манипуляции [39]. Регулярная фазовая манипуляция («метод вращающейся фазы») позволяет уменьшить манипулятивные искажения на передаче и упростить условия синхронизации в приемном тракте.

Фазовое детектирование в условиях рассинхронизации может быть выполнено посредством использования когерентного демодулятора, основой которого является дискретная система синхронизации [4], полоса синхронизации которой должна быть не менее Δf.

На демодулятор поступает сигнал с входного усилителя *10*, ограниченный по полосе (3,0—3,4 кГц) и амплитуда в фильтре-ограничителе *11*. Собственно синхронизатор состоит из фазового дискриминатора *12*, на котором сравниваются фронты фазоманипулированных видеоимпульсов частоты $f_т$ с синхросигналами частоты $2f_т$, поступающими с управляемого делителя *13*, подключенного к генератору *3*. Коэффициент деления последнего определяется соотношением $n+2^м=f_г/f_т$. Полоса синхронизатора ΔF должна превышать возможную рассинхронизацию в канале связи Δf $(\Delta F>\Delta f)$ и определяться из условий синхронизма $\Delta F=2f_т/n$ при условии подстройки за каждый период поднесущей частоты $2f_т$ [4].

Сфазированные синхросигналы подаются на фазовый детектор *14* совместно с фазоманипулированными сигналами. С выхода фазового детектора *14* снимаются (после соответствующего формирования) выходные двоичные сигналы. Одновременно синхросигналы с частотой $2f_т$ подаются на вход преобразователя частоты *16* совместно с частотномодулированным сигналом управления, полоса (2,7—3,0 кГц) и амплитуда которого ограничена в фильтре-ограничителе *15*. В спектре суммарных и разностных частот на выходе преобразователя *16* выделяется сигнал изменяющейся частоты $f_т—f_у$, который подается на частотный демодулятор *17*.

Сигнал огибающей речи с выхода демодулятора *17* поступает в речевой подканал *18* для управления экспандером.

Таким образом, анализ функциональной схемы телефонно-телеграфного модема свидетельствует о возможности оптимизации режимов работы радиокомпандера и радиотелеграфного канала путем комплексного решения некоторых общих задач формирования и демодуляции сигналов.

На первом этапе возможна организация параллельного телеграфного канала без передачи данных в паузах речи. На следующем этапе возможно подключение стандартного многоканального модема передачи данных, каждый подканал которого подобен телеграфному модему. Передача и прием данных в многока-

нальном модеме коммутируется эхо-заградителем радиокомпандера, причем синхронизация сигналов в модеме, работающем в стартстопном режиме, должна осуществляться синхронными сигналами телеграфного модема.

Данные должны передаваться параллельным машинным кодом по всем подканалам многоканального модема. Следовательно, число параллельных (частотных и фазовых) подканалов модема определяется числом разрядов кода, зафиксированного на машинном носителе информации (например на перфоленте), так как каждый разряд кода передается сигналом в своем подканале модема.

Такой метод передачи—приема удобен при стартстопной связи, так как продвижение носителя информации в трансмиттере происходит только во время предоставления канала связи — в паузе речи. Соответственно регистрация принимаемых многоканальных сигналов в паузах речи ведется по каждой кодовой комбинации, например на перфораторе, который формирует перфоленту—машинный носитель данных. Параллельный метод передачи данных в многоканальном модеме позволяет использовать симплексные детекторы качества связи, так как дуплексное обнаружение или исправление ошибок при передаче данных в паузах речи затруднительно.

Упомянем также о том, что путем дополнительной фазовой манипуляции управляющего частотноманипулированного сигнала радиокомпандера можно передавать данные одновременно с передачей сигнала управления. Однако производительность такого дополнительного канала незначительна в связи с тем, что полоса управляемого канала нормирована и сопряжена с девиацией частоты в нем. Этот вариант может представлять интерес для передачи сигналов телеуправления.

Таким образом, в единственном телефонном канале возможно одновременно передавать речевые и телеграфные сигналы, а также сигналы данных и телеуправления.

Итак, организация телефонно-телеграфных каналов связи в спектре ТЧ канала целесообразна в многоканальных системах дальней радиосвязи, а также в сетях низовой телефонной связи для передачи данных АСУ. Технической базой реализации телефонно-телеграфного модема может служить радиокомпандер и модем тонального телеграфа с фазовой манипуляцией. Анализ функциональных схем модемов с параллельным и последовательным способами передачи данных в телефонном канале позволяет получить основные расчетные соотношения для проектирования аппаратуры и оптимизировать режим работы модема.

При параллельном способе передачи речи и данных в спектре ТЧ канала функционирует трехканальный модем (полоса речевого подканала 0,3—2,7 кГц, полоса управляющего подканала 2,7—3,0 кГц; полоса канала для передачи буквенно-цифрового текста 3,0—3,4 кГц).

При последовательном способе передачи речи и данных дискретные сигналы передаются в полосе 0,3—2,7 кГц во время пауз речи, причем коммутатором «речь—данные» служит эхо-заградитель радиокомпандера, работающий по управляющему каналу.

При параллельно-последовательном (наиболее совершенном) методе передачи речевых и дискретных сигналов телеграфный канал используется для синхронной передачи сигналов, а для передачи данных в паузах речи служит модем тонального телеграфирования, состоящий из набора подканалов, аналогичных телеграфному.

3.6. ДИСТАНЦИОННЫЙ ВВОД РЕЧИ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ АСУ

Революционизирующее воздействие вычислительной техники, внедряемой в народном хозяйстве, связано с решением новых технических проблем, одной из которых стала проблема человеко-машинного общения. Применительно к отрасли связи эта проблема выдвигает комплекс задач дистанционного человеко-машинного диалога многочисленных телефонных абонентов с ЭВМ, входящими в состав автоматизированных систем управления (АСУ) или информационно-поисковых систем (ИПС). Решение задачи диалогового речевого общения человека с ЭВМ по стандартным телефонным каналам связи позволит по-новому проектировать информационные системы массового обслуживания, перспективные услуги связи. Так, например, речевой набор номера облегчает переход в телеграфии от телетайпа к дисплею (человеко-машинному терминалу), который эквивалентен переходу от одностаночной к многостаночной работе в промышленности — при сборе телеграмм по телефону резко возрастает производительность труда телеграфиста-оператора дисплея [89].

Несмотря на наличие различных способов ввода данных в ЭВМ (клавиатура, световое перо и т. п.), речевой ввод сигналов с телефонного аппарата представляется наиболее удобным для человека [90]. Ручной ввод графических [91] и речевых данных посредством телефонной связи позволит внедрить массовое информационное обслуживание. Спецификой дистанционного человеко-машинного общения остаются задачи повышения точности машинного распознавания речи, поскольку в системах массового доступа абонентов в информационные системы возникают проблемы нивелировки сильно различающихся голосов абонентов и входных уровней речевых сигналов, поступающих с различных абонентских линий телефонной сети. Основной техникой анализа и синтеза речи в человеко-машинных АСУ является техника частотного и амплитудного компандирования речи, поскольку машинное распознавание речи и машинный речевой ответ требуют накопления и обработки в ЭВМ огромного объема двоичных сигналов [92].

Так, например, при полосе речевого сигнала 3000 Гц и динамическом диапазоне уровней речи в 60 дБ объем вводимой в

ЭВМ информации составляет 60 000 бит/с, т. е. в среднем на шестизначный номер вводится 1 млн. бит.

Частотные и амплитудные компандеры позволяют сократить объем обрабатываемых ЭВМ данных в десятки раз, что соответственно повышает использование ЭВМ и позволяет увеличить число абонентов в системе. Кроме того, частотная компрессия речи позволяет нивелировать индивидуальные особенности абонентов (недостаток вокодеров — потеря натуральности звучания — в данном случае становится достоинством, так как ЭВМ легче распознает типовые «вокодерные» звуковые образы).

Амплитудное компандирование необходимо и потому, что гарантирует стабилизацию уровней абонентов на входе системы, обеспечивая тем самым взаимодействие АСУ с любым удаленным абонентом, где бы он ни находился. Возможности речевого ввода данных в ЭВМ грандиозны, а реализация — в той или иной степени неизбежна, так как постоянно растет несоответствие между быстродействием ЭВМ и малой скоростью ручного ввода данных.

Кроме того, речевой ввод исключает необходимость в оснащении массы телефонных абонентов дополнительными устройствами (клавиатуры, модемы и т. п.) и позволяет занятому оператору, например пилоту, «говорить с ЭВМ без отрыва от производства». Наконец, речь — самый естественный, а потому и самый удобный метод общения.

Однако задача машинного распознавания человеческой речи не может быть решена полностью ввиду чрезвычайной сложности. Помимо сложности распознавания множества «слуховых образов», возникают проблемы оценки смыслового содержания речи — иначе говоря, если для речевого машинного вывода следует смоделировать речеобразующий аппарат человека, то для «слушающей» машины необходимо смоделировать и слуховой аппарат, и сам мозг, что и ставит предел машинным возможностям в распознавании речи.

Поэтому необходимо разделить соответствующие этапы внедрения устройств распознавания речи в АСУ, для чего рассмотрим возможное применение таких устройств при разработке перспективных услуг связи.

Речевой ввод телефонных запросов в АСУ или ИПС может производиться по-разному в зависимости от назначения системы (рис. 3.21). Поэтому системы речевого ввода (*1*) можно разделить на общедоступные (*2*), которые должны обеспечить обслуживание любого телефонного вызова, и приоритетные (*3*), которые обслуживают абонентов после их опознавания.

Простейшими системами речевого ввода являются вызывные системы, посредством которых любой человек, назвав соответствующий набор цифр по телефону, может получить в ответ стандартную справку (о времени, погоде, о программе концерта, кино или о расписании транспорта и т. п.). В такой вызывной системе устройство распознавания речи должно различать ограниченный

цифр и несколько слов типа «повторите», «понятно» и «верно» набор звуков, число которых не превышает двух десятков (десять и т. п.). Ограниченный набор звуковых образов гарантирует высокую точность распознавания, которая должна быть не ниже точности установления соединения в телефонной сети.

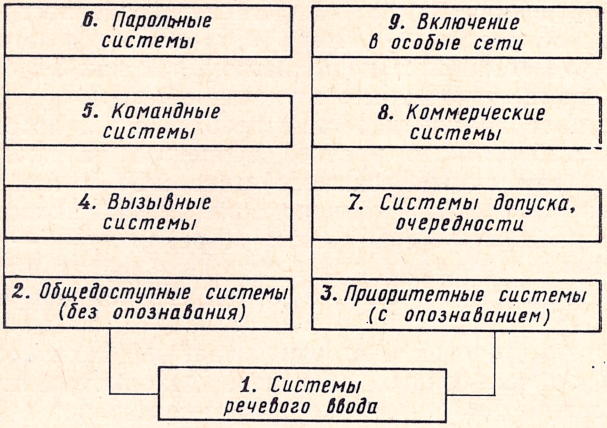


Рис. 3.21. Классификация систем речевого ввода в АСУ

На первом этапе внедрения речевые вызывные системы могут использоваться для соединения абонента с вторичными сетями (например, вход из городской телефонной сети в учрежденческую АТС, где роль телефонистки исполняет «слушающий» автомат). В дальнейшем речевой вызов может стать одним из основных элементов адресации сообщений (телеграмм, телефонограмм и т. п.), поскольку распознав шестизначный почтовый адресный индекс, ЭВМ может соответственно скоммутировать сообщение. Наконец, можно представить себе телефонный аппарат без номеронабирателя — аппарат с речевым набором номера, при котором «слушающий» распознаватель номеров на АТС автоматически соединит собеседников.

Распознаватели речи более высокого класса должны обеспечивать повышенную точность при увеличенном наборе словесных команд. Такие командные системы необходимы для управления сложными комплексами в быстросменяющейся обстановке (например при управлении движущимся транспортом, работе на конвейере), а также в любых тех случаях, когда оператор занят основной деятельностью и вместо названия нескольких цифр ему удобнее отдать команду, которая должна быть выполнена автоматом немедленно. Еще более совершенными системами речевого ввода являются парольные системы, реагирующие только на определенную совокупность слов (осмысленная фраза или бессвязный набор слов).

Парольные системы по назначению близки приоритетным системам и отличаются только отсутствием функции опознавания абонента, что позволяет пользоваться ими любому лицу, знающему пароль. Поскольку важность задач, охраняемых паролем, велика, а объем звуковых образов соответственно возрастает, возрастают и требования к точности распознавания речи. Поэтому парольные системы сложнее и дороже вызывных и командных.

Приоритетные системы могут выполнять функции вызывных, командных и парольных систем с тем, однако, отличием, что «слушающий автомат» реагирует только на один голос или несколько «допущенных» голосов. Известно, что голос так же индивидуален, как отпечатки пальцев, и поэтому предоставляется ценнейшая для систем возможность распознавать абонентов на расстоянии. Простейшими системами могут быть системы допуска, позволяющие системе определять тех абонентов, которые подлежат определенному информационному обслуживанию. При этом важно не только исключить выдачу машинной информации случайному телефонному абоненту, но и уменьшить вероятность отказа в выдаче данных допущенному лицу в случае изменения его голоса (например при простуде).

Системы допуска могут обеспечивать также внеочередное обслуживание приоритетных абонентов АСУ и ИПС, различая их в общем массе пользователей.

Коммерческие системы речевого ввода позволяют осуществлять дистанционно торговые или денежные операции — например заказ тех или иных товаров по телефону, получение транспортных или зрелищных билетов, поскольку опознавание заказчика эквивалентно его подписи под требованием и позволяет осуществлять расчеты с клиентом в кредит или по заранее приобретенным абонементам.

Наконец, в случае передачи негласных сведений система с опознаванием абонентов позволяет автоматически скоммутировать их переговоры в системы связи, обеспечивающие засекречивание речи. Важно подчеркнуть, что речевой ввод многих рассредоточенных телефонных абонентов осуществляется стандартными слушающими автоматами, размещенными на АТС, каждый из которых одновременно может обслуживать группу абонентов. Автомат при этом работает в режиме разделения времени, но его быстродействие должно обеспечивать любому абоненту эффект индивидуального обслуживания. Возможная классификация типовых распознающих речь автоматов представлена в табл. 3.3.

Рассмотрение таблицы показывает, что системы классов А и Б обеспечивают реализацию возможностей, показанных на рис. 3.21. В то же время проектирование системы класса В, которая может обеспечить распознавание смыслового текста ЭВМ в диалоговом режиме, представляется сложной проблемой будущего [93].

На рис. 3.22 представлена структурная схема системы дистанционного ввода телефонных запросов, позволяющая решить основ-

ТАБЛИЦА 3.3

Классы	Назначение	Выполнение	Признаки сообщения	Возможность диалога
А	Ввод номеров	Приборное	Общие для всех абонентов	Повторение, отказ
Б	Ввод команд, фраз, номеров	Программное	Индивидуальное опознавание	Подтверждение, совет, отказ
В	Ввод смыслового текста (слитная речь)	Приборно-программное	Общие и индивидуальные	Уточнение запроса, полный диалог

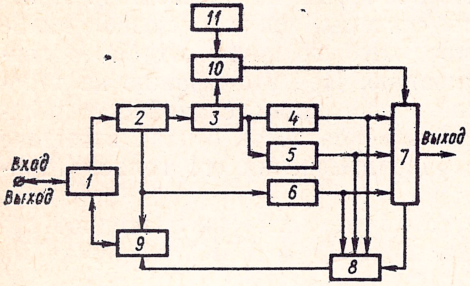


Рис. 3.22. Структурная схема системы речевого ввода

ные задачи человеко-машинного общения в АСУ и ИПС при ограниченном объеме распознавания звуковых образов. (Технология распознавания речи как процесс здесь не рассматривается ввиду специфики данной проблемы.)

Входным элементом слушающего автомата (рис. 3.22) является дифференциальная система *1*, обеспечивающая согласование системы с телефонным каналом связи. Речевой сигнал поступает на управляемый компрессор *2*, который формирует сигналы постоянного уровня, исключая зависимость точности распознавания речи от разброса затухания в абонентских линиях и различий в громкости голосов абонентов. Кроме того, сжатие динамического диапазона речи позволяет уменьшить объем памяти анализатора речи.

Компрессированный сигнал поступает в блоки распознавания речи *3*—*7*, блоки опознавания абонента *10* и *11*, а выходной сигнал распознавания вводится в блоки контроля исполнения *8* и *9*, которые замыкают диалоговую телефонную цепь.

Распознаваемый сигнал поступает с компрессора *2* на вокодер *3*, который исключает тональную индивидуальность голосов и заменяет человеческие голоса единым машинным голосом. Вокодер *3* может выполняться различными способами, однако синтезирующие звук каскады включаются не на воспроизводящее акустическое устройство, а подключены к анализаторам сигналов распознавания *4* и *5*, которые подобны анализаторам вокодера *3*. Анализатор гласных *4* формирует набор двоичных сигналов, соответствующих среднему значению уровней сигналов различных гональностей за фиксированный интервал времени (около 20 мс). Анализатор согласных *5* соответственно формирует двоичные сигналы высокочастотного участка спектра.

Кроме сигналов анализа гласных и согласных (шумовых) звуков вокодера к блоку распознавания *7* подводятся сигналы «речь—пауза», формируемые анализатором пауз *6*, на вход которого поступает сигнал огибающей речи с управляющего выхода компрессора *2*. В блоке распознавания *7*, который выполняется в виде специализированного дешифратора состояний или содержит программируемую мини-машину, производится обработка входных сигналов по жесткому алгоритму распознавания звуков путем сравнения комбинаций поступающих сигналов с эталонами, хранящимися в памяти, и выбора наиболее сходного варианта.

Сигнал распознавания выводится на машинный носитель информации только после того, как абонент подтвердит верность распознавания. В противном случае речевой ввод должен быть повторен.

Для формирования звукового контрольного сигнала включен синтезатор речи *8*, вход которого объединен с контрольным выходом блока распознавания, а выход подключен к управляемому экспандеру *9*, на управляющий вход которого поступает с компрессора *2* сигнал огибающей речи. Задержка речевого сигнала должна быть, естественно, согласована с временными характеристиками тракта управления. Управляемый экспандер обеспечивает естественную форму огибающей контрольного сигнала, что повышает натуральность машинного голоса и подавляет помехи в составе синтезированного сигнала. Выходной сигнал экспандера *9* через дифференциальную систему поступает к абоненту. Таким образом, абонент, называя каждую цифру номера, слышит ответ автомата и может удостовериться в верном распознавании речи или потребовать повторный ввод номера.

Только после отсутствия требования на повторение автомат выдает в АСУ или ИПС распознанный вызывной сигнал.

При необходимости опознавания абонента сигналы с анализатора вокодера *3* поступают в блок опознавания *10*, куда подаются также сигналы с блока паролей *11*. В блоке паролей хранятся индивидуальные характеристики голосов допущенных абонентов. Выходной сигнал блока опознавания разрешает или запрещает распознавание запроса, о чем автомат сообщает абоненту.

Рассмотренная структурная схема системы речевого ввода является типовой, так как обеспечивает функции распознавания, опознавания и контроля речевого ввода независимо от местонахождения абонента, что достигается применением устройств компандирования речи. Данная схема рассчитана на распознавание отдельных команд, хотя и для случая распознавания слитной речи основные функциональные блоки необходимы.

Анализ схемы показывает, что амплитудная и частотная компрессия вводных сигналов позволяет обеспечить следующие преимущества по сравнению с вводом естественной речи:

— объем сигнала, выраженный в двоичном коде, уменьшается в десятки раз, что позволяет использовать универсальные ЭВМ с ограниченным объемом оперативной памяти;

— существенно уменьшается машинное время, необходимое на распознавание речи;

— обеспечивается сопряжение информационных каналов ЭВМ с плотностью поступающих данных без изменений в конструкции ЭВМ;

— обеспечивается дистанционное человеко-машинное общение по стандартным телефонным каналам;

— обеспечивается контроль распознаваемых команд в диалоговом режиме.

Итак, компандирование речевых сигналов является необходимой функцией в автоматизированных системах сбора информации, информационно-справочных и технологических системах.

Сообщается, например, [91] о том, что устройство распознавания речевых команд позволяет ускорить сортировку багажа почти в два раза. Это же устройство может быть широко использовано в различных сферах деятельности для сокращения документооборота. Аппаратура *VJP100* обрабатывает 150 слов и коротких фраз посредством комплекса средств, состоящего из анализатора речи, малой ЭВМ, дисплея и буквопечатающего устройства. При настройке набор команд совместно с программой их исполнения начитывается в микрофон и записывается на буквопечатающем аппарате. Оператор повторяет каждое слово 10 раз для адаптации системы к данному голосу. Объем памяти ЭВМ позволяет осуществлять анализ голосов 16 операторов. Правильность распознавания в процессе настройки контролируется по дисплею с возможностью коррекции ошибок. Аппаратура распознавания речи комплектуется синтезатором речевого ответа, так что может быть реализована человеко-машинная диалоговая система.

3.7. РЕЧЕВОЙ ВЫВОД ДАННЫХ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ АСУ

До недавнего времени проблема речевого общения человека с ЭВМ относилась к области научной фантастики, однако в последнее десятилетие возникли и получили решение вполне реальные задачи [93].

Появление нового класса оконечного оборудования — диалоговых человеко-машинных видеопультов (дисплеев), дополненных устройствами дистанционного факсимильного документирования информации [94], позволяет проектировать различные системы информационного обслуживания рассредоточенных абонентов. Однако оператор видеопульта, получая только визуальную информацию, не использует свой слуховой информационный канал и испытывает постоянное зрительное переутомление, поскольку вынужден работать не отводя взгляда от экрана.

Кроме того, очевидно, что свободный доступ массовых абонентов в АСУ возможен не на основе установки видеопультов у всех абонентов и обучения их работе на клавиатуре, а на основе использования для человеко-машинного диалога стандартного теле-

фонного аппарата или таксофона. Следовательно, человеко-машинные справочные системы массового обслуживания возможны лишь при организации диалога на естественном человеческом языке.

В результате научных исследований по анализу и синтезу речевых сигналов [6, 7, 19] в настоящее время появилась возможность поставить задачу практического внедрения аппаратуры речевого вывода машинной информации в человеко-машинных системах информационного обслуживания. С другой стороны, в практику справочных систем широко входят различные устройства речевого оповещения (речевые автоматы, сообщающие сведения о времени, погоде, программах кинотеатров и т. п.), основанные на передаче телефонным абонентам магнитозаписей стандартных фраз.

Вот почему необходимо уточнить область применения устройств дистанционного человеко-машинного общения в отрасли связи, имея в виду, что специфика отрасли заключается в массовом информационном обслуживании рассредоточенных абонентов. Так, различные справочные службы (например служба «09») функционирует только при речевом вводе и выводе информации (телефонный запрос абонента — телефонный ответ оператора справочной службы).

Пока не ставится задача полной замены оператора машиной, поскольку прием речевого запроса остается чисто человеческой функцией осмысливания принятой информации, уточнения ее путем переспроса, принятия неформализуемых решений. Однако простой вызов (команду) ЭВМ может воспринять, а речевой ответ абоненту может быть синтезирован машиной, что существенно разгружает оператора справочной службы, позволяет повысить производительность и качество его труда.

Следовательно, задача сводится к тому, чтобы определить оптимальный вариант построения типовых устройств речевого ответа, оценить полезный эффект от внедрения их в управленческих и технологических АСУ отрасли связи. Для решения поставленной задачи следует разработать классификацию устройств речевого ввода и вывода машиных данных, а также выбрать устройства, целесообразные в конкретных условиях.

С точки зрения системотехники речевой вывод машинной информации можно определить как самостоятельную систему, поскольку для ее функционирования необходимы информационное обеспечение (определенный запас сведений), математическое обеспечение (алгоритмы выбора и представления сведений), комплекс технических средств (устройства формирования речевого сигнала и доставки его от ЭВМ к удаленному абоненту по каналу электросвязи).

Многообразие современных систем речевого вывода (только в США и Западной Европе к 1975 г. ожидалось использование 10 000 разных речевых терминалов) и условий их эксплуатации [36] делает необходимым создание классификации, посредством которой можно определить типовые решения.

Различая системы речевого ответа по назначению, прежде всего можно разделить их на симплексные и дуплексные (рис. 3.23). Симплексные системы речевого ответа (*1*) функционируют без вмешательства абонента и обеспечивают ответ по телефонному вызову или без него, т. е. обеспечивают вызов абонента самостоя-

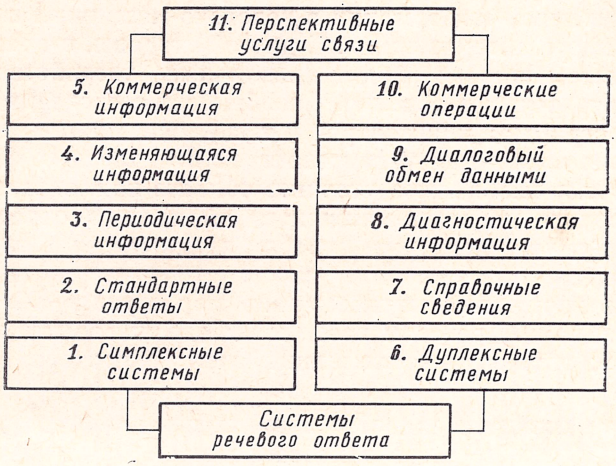


Рис. 3.23. Классификация систем речевого вывода в АСУ

тельно. Дуплексные системы (*6*) речевого ответа функционируют в диалоге с телефонным абонентом.

Соответственно симплексные и дуплексные системы можно разделить по применению в АСУ различного назначения — ориентированных на решение управленческих или технологических задач, а также задач информационного обслуживания населения. Однако на базе классификации систем речевого ответа можно сделать вывод о том, что возможны типовые решения, которые практически независимы от назначения АСУ и отличаются только содержанием информационного обеспечения, объемом математического обеспечения и емкостью запоминающих устройств.

Итак, рассмотрим симплексные системы речевого ответа. Простейшей формой стандартных ответов (*2*) являются извещения абонентов ГТС (например об изменении номера АТС), при которых каждый абонент, набрав любой номер, слышит сообщение, одинаковое для всех. Содержанием стандартных ответов могут быть объявления отдельных учреждений (например объявления о выставках или о фильмах в кинотеатрах и т. д.).

Общим свойством стандартных ответов является то, что информация не изменяется во время функционирования системы и, следовательно, может вводиться в телефонный тракт посредством несложных устройств магнитной записи-воспроизведения. Системы выдачи периодической информации (*3*) также выполняются на базе магнитовоспроизводящих устройств и позволяют получать

абоненту информацию, которая периодически обновляется по заданной программе. Подобные системы сообщают абонентам разные изменяющиеся сведения: о времени, о погоде и о различных расписаниях (например объявление остановок в метро).

Следующий вид симплексных систем позволяет абонентам при наборе определенного номера получить изменяющуюся информацию (*4*), причем изменения данных происходят не периодически, а по случайным законам. К таким системам относятся технологические системы автоконтроля ситуации (например системы автоконтроля качества связи, системы аварийного оповещения, системы вывода промежуточных данных из ЭВМ), любые диагностические системы контроля технологических процессов.

Коммерческая информация (*5*) может сообщаться абонентам телефонной сети периодически (например устные счета за коммунальные или другие услуги) и нерегулярно (в тех случаях, когда необходимо известить абонента о каком-либо событии: напоминание об уплате взносов, приглашение на почту, в ателье и т. д.).

Анализ дуплексных систем речевого ответа позволяет проследить ту же тенденцию усложнения, которую легко заметить в симплексных системах. Так, если получение справочных сведений (*7*) сводится к сообщению абоненту телефонного номера, адреса или другой формальной информации, то при необходимости выдачи диагностической информации (*8*) диалог абонента и оператора АСУ усложняется для уточнения деталей запроса, от чего зависит точность и полнота выданных АСУ советов и рекомендаций.

Фактически, в дуплексных системах речевого ответа необходимо решение неформальных логических задач, чего практически нет в симплексных системах.

Еще более усложняется диалоговый обмен данными, когда абонент через оператора вводит в АСУ свою задачу или анализирует различные варианты решения задачи, причем этот режим явно не укладывается в рамки реального времени, т. е. переходит в режим симплексного ответа-вызова абонента после решения его задачи. Дуплексные коммерческие системы (*10*) должны обеспечивать не только оформление заказов, но и расчеты с абонентами, причем и оформление заказов, и расчеты могут производиться как в разовом порядке (в реальном масштабе времени), так и в кредит (с оповещением клиента о сроке уплаты).

Все указанные режимы работы систем речевого ответа так или иначе могут быть использованы при разработке перспективных услуг связи, ориентированных на самообслуживание абонента в условиях функционирования АСУ. Например, возможна передача телефонограмм, при которой отправитель диктует сообщение, передаваемое в каналах связи телеграфным кодом и воспроизводимое получателю синтезатором речи по телефону. Другим примером может быть система персонального радиовызова, при которой ЭВМ кодом вызывает абонента и голосом сообщает подвижному абоненту необходимые данные. Рассмотрение различных симплекс-

ных и дуплексных систем речевого ответа позволяет выявить общие черты систем.

Очевидно, что аппаратура речевого ответа может быть реализована в двух вариантах — магнитомеханическом и электронном, в зависимости от назначения системы. Так, устройства магнитной записи могут использоваться в простейших симплексных и дуплексных системах — стандартные ответы (*2*), периодическая информация (*3*), справочные сведения (*7*), т. е. в тех случаях, когда сообщается постоянная или периодически обновляемая информация. В остальных случаях — при быстром изменении содержания сообщений, ориентированных на многих пользователей, устройства магнитной записи неприменимы, ибо резко возрастают объем памяти и время ожидания абонента (при необходимости перезаписи или поиска сообщений — перемотка ленты). Другим ограничением при проектировании магнитомеханических систем служит рост числа абонентов, поскольку устройство воспроизведения записи может обслуживать нестандартной информацией только одного абонента. Напротив, электронная система речевого ответа, выполненная на базе ЭВМ, обеспечивает одновременный ответ многим абонентам (при наличии абонентских синтезаторов речи) за счет высокого быстродействия. Таким образом, можно ограничиться двумя классами систем речевого ответа, поскольку их сочетание не обладает достоинствами: при получении переменной информации с ЭВМ использование электронных синтезаторов речи проще применения магнитомеханической аппаратуры.

Соответствующая классификация представлена в табл. 3.4.

ТАБЛИЦА 3.4

Классы	Назначение	Выполнение	Признаки сообщения	Возможность диалога
А	Оповещение по жесткой программе	Устройства воспроизведения магнитной записи речи	Общие для всех абонентов	Отсутствует
Б	Оповещение по гибкой программе	Устройства машинного синтеза речи	Индивидуальные для каждого абонента	Имеется

Только при использовании систем классов А и Б по своему прямому назначению отсутствуют ограничения в количестве абонентов, в объеме воспроизводимого словарного фонда и в быстроте ответа для каждой из этих систем.

Поскольку информационно-поисковые системы АСУ рассчитаны на выдачу смысловой изменяющейся информации, ниже будем рассматривать системы класса Б.

Так как вывод речевой информации телефонным абонентам производится по их запросу, следует рассмотреть способы запроса речевых сообщений в АСУ, с тем чтобы определить взаимодействие запросов и ответов при функционировании системы.

Как указывалось выше, способы речевого ввода смыслового запроса в настоящее время разработаны недостаточно. Поэтому реализуются различные электромеханические устройства ввода запроса в информационно-поисковые системы (ИПС) по телефонным каналам связи. Известны телефонные аппараты с тастатурой, устройства с акустическим, индуктивным, гальваническим или иным вводом сигналов в телефонный канал, с помощью которых удаленный абонент вводит свой запрос в ЭВМ [25]. Датчики запросов целесообразны также в терминальных замкнутых системах (например, в учрежденческих АТС; научных или проектных организациях, где общедоступная ЭВМ может заменить многочисленные и малозагруженные клавишные вычислители). Вводя кодовые запросы (данные), абоненты получают результаты вычислений по телефону с устройства речевого ответа. Такую систему диалога «абонент — ЭВМ — абонент» можно назвать «абонентской». Данный способ имеет существенные недостатки, связанные не только с необходимостью внедрения огромного парка вызывных телефонных приставок, но и с фактом допуска в ИПС массовых неподготовленных абонентов.

Альтернативным решением является диспетческая система, при которой телефонный абонент задает вопрос оператору справочной службы и получает речевой машинный ответ.

Соответственно в ОАСУ администратор должен обращаться к ЭВМ через референта-оператора.

Формирование запроса оператором, а не абонентом обеспечивает следующие преимущества в эксплуатации информационно-справочных систем:

— абонент, задавая вопрос по телефону, уточняет его в процессе диалога без каких-либо вспомогательных устройств и без освоения навыков общения с ЭВМ, что существенно снижает вероятность ошибочных запросов и выдачи ложных ответов;

— сокращается время занятия канала связи, ибо вопрос в речевой форме задается быстрее, чем производится ручной ввод запроса посредством номеронабирателя или тастатуры;

— сокращается время диалога с ЭВМ за счет исключения опознавания абонента, исключается передача данных от абонента к ЭВМ;

— не требуется модернизация эксплуатирующихся АТС, необходимая в случае использования телефонного аппарата как устройства передачи запроса, так как в существующих АТС обработка дополнительных номеров не предусматривается;

— повышается надежность работы системы, ибо массовая абонентская вызывная сеть является наименее надежным звеном.

Следует добавить, что для унификации технологии функционирования справочных систем целесообразно использование типового

пульта оператора — «говорящего дисплея». Говорящий дисплей («звукопульт») является человеко-машинным диалоговым терминалом, обеспечивающим ручной ввод запорса в ЭВМ и речевой ответ в абонентскую телефонную сеть.

В комплекс аппаратуры формирования речевого ответа входят ЭВМ, анализатор и синтезатор речи. Принцип действия такого комплекса состоит в том, что в соответствии с предварительным анализом тестовых фраз, содержащих специфические звукосочетания, в память ЭВМ вводится фонетический код, посредством которого (в соответствии с программой выдачи информации) управляется синтезатор, способный воспроизвести человеческий голос.

Собственно синтезатор речи состоит из генераторов тона и шума, управляемых по программе синтеза речевого ответа, т. е. устройств управления основным тоном и огибающей спектра речевых сигналов. Структурная схема синтеза с речевым ответом (рис. 3.24) содержит звукопульты — рабочие места операторов

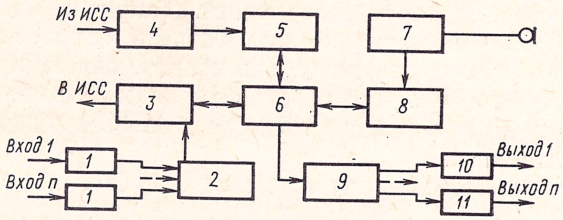


Рис. 3.24. Структурная схема системы речевого вывода

справочной системы *1*. Операторы принимают телефонные запросы абонентов и вводят запрос в ИПС. Следовательно, звукопульт должен содержать три основных блока: гарнитуру для диалога с абонентом, клавиатуру с набором информационных и функциональных клавиш (код пульта, код запроса, приоритет, адрес абонента, квитанции и т. п.) и индикатор ответа, сигнализирующий о выполнении заказа. Сигналы с клавиатуры любого звукопульта поступают на коммутатор звукопультов *2*, поскольку быстродействие ЭВМ позволяет обслуживать одновременно группу звукопультов. Коммутатор *2* выдает маркированные запросы каждого звукопульта в накопитель запросов *3*, с которого сигналы поступают на обработку в ИПС по сигналу с последней. Одновременно сигнал запроса вводится в ЭВМ *6* для подготовки формирования ответной фразы. Справочная (ответная) информация от ИПС поступает в накопитель справочных данных *4*, откуда выводится в формирователь программ синтеза речи *5*. С формирователя *5* в ЭВМ поступают программы, совмещающие стандартные элементы программы (например слово «повторяю») и обновленные сведения. Кроме того, в ЭВМ вводятся сведения о речевых элементах в виде последовательности кодов. Эта последовательность записывается в ОЗУ и по программе выборки кодовые комбинации речевых эле-

ментов поступают из памяти ЭВМ на управление синтезаторами речи. Библиотека речевых элементов (например фонетический код) формируется из тестовых фраз, содержащих тематическую информацию, посредством анализатора речи *7*. При изменении тематики справок в анализатор должна быть введена другая информация, содержащая специфическую терминологию, достаточную для формирования речевых элементов, необходимых для синтеза фраз по новой тематике. Библиотека звуковых словарей хранится в накопителе речевых элементов *8* и используется ЭВМ по мере построения программ управления синтезаторами. Сигналы, управляющие группой синтезаторов, поступают из ЭВМ через коммутатор синтезаторов *9*, подключающий поочередно каждый синтезатор к выходу ЭВМ, быстродействие которой позволяет выдать несколько программ управления за время формирования ответной фразы. Синтезаторы *10* и *11* обеспечивают прием и хранение управляющих сигналов, генерацию ответной фразы и передачу ее абоненту по телевизионному каналу связи (с автоматическим вызовом абонента).

Рассмотренная структурная схема позволяет сделать заключение о том, что вне зависимости от информационного назначения системы (в рамках класса Б) возможно проектирование типового комплекса оборудования. Важно подчеркнуть, что в зависимости от конкретных условий (объем словаря, количество абонентов, характер информации и т. д.) вполне возможно использовать общую ЭВМ как для ИПС, так и для системы речевого вывода.

В тех случаях, когда системы с речевым ответом обеспечивают выдачу машинной информации по речевому запросу телефонного абонента, звукопульт *1* должен быть заменен системой речевого ввода (см. рис. 3.21), обеспечивающей за счет компандирования речи человеко-машинный дистанционный диалог. Кроме того, амплитудное, частотное и временно́е компандирование необходимо использовать для сокращения объема памяти в накопителе речевых элементов *8*, и повышения скорости обработки сигналов в процессоре *6*. Поэтому управляемый компрессор должен входить в состав анализатора *7*, а управляемый экспандер — в состав синтезаторов *10*.

Выигрыш от компандирования обрабатываемой в ЭВМ речи можно определить, например, по сокращению объема оперативной машинной памяти, причем выигрыш $B_п$ определяется произведением коэффициентов амплитудной компрессии α и частотной компрессии γ: $B_п = \alpha\gamma$, где $\alpha > 1$, $\gamma > 1$.

Соответственно для реализации системы можно выбрать ЭВМ с меньшим объемом памяти (например использовать мини-машины).

Выигрыш во времени обработки также определяется сокращением объема речевого сигнала и позволяет увеличить производительность системы соответственно в $B_п$ раз за счет роста числа одновременно обрабатываемых запросов.

Экономическая эффективность справочных систем с речевым вводом — выводом $Э$ базируется как на сокращении трудовых затрат операторов, так и на повышении производительности справочных служб.

Себестоимость эксплуатации ИПС с речевым вводом — выводом $C_р$ ниже себестоимости эксплуатации систем с ручным обслуживанием C_0, а соответствующие капитальные затраты, наоборот, выше $K_р > K_0$, так как вводится новое оборудование:

$$Э = (C_0 + E_н K_0) - (C_р + E_н K_р)/B_п,$$

где $E_н$ — нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений ($E = 0{,}12$).

4

Функциональные элементы проектирования радиотелефонного канала связи

4.1. КОМПАНДЕР И ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Одним из основных функциональных элементов современного радиотелефонного канала связи является, естественно, компандер. Вопросы проектирования и расчетов компандеров разработаны достаточно полно, поскольку техника компандирования звуковых сигналов в многоканальных системах связи имеет полувековую историю [95—100].

Однако внедрение метода управляемого компандирования в радиосвязи связано с решением вновь возникших задач, обусловленных особенностями метода. К числу таких задач принадлежат вопросы оценки эффективности внедрения компандеров, а также вопросы эксплуатации радиоканалов с компандированием сигналов.

Недостаточно разработана методика оценки эффективности радиокомпандеров, измерения параметров каналов с управляемым компандированием. Поэтому рассмотрение указанных аспектов проблемы внедрения новой техники радиосвязи остается актуальной задачей.

Компандирование звуковых сигналов изменяет режимы работы линии связи и соответственно режим приема звуковых сигналов в условиях помех. Поэтому количественная оценка эффективности применения компандера зависит от условий функционирования линии связи или ее участка и выражается степенью ослабления влияния помех при наличии определенных ограничений.

Так, в условиях отсутствия шумов на входе компрессора и в предположении наличия малых шумов в канале связи ($U_ш \ll U_с$)

можно определить выражение для величины ослабления шума при введении компандера [95].

Определяя компрессор и экспандер, как нелинейные четырехполюсники с коэффициентами регулирования $\alpha<1$ и $\beta>1$ (причем $\alpha\beta=1$), можно записать выражение для компрессированного сигнала

$$U_2 = K_1 C_1 (U_1/C_1)^{\alpha}, \tag{4.1}$$

где U_1 и U_2 — напряжения на входе и выходе компрессора соответственно, а K_1 — коэффициент передачи компрессора при $U_1 = C_1$. (При $U_1=C_1$ коэффициент передачи имеет значение K_0). К компрессированному сигналу (4.1) в линии связи добавляется шумовое напряжение $U_{ш}$. Следовательно, входное напряжение экспандера U_3 будет определяться геометрической суммой:

$$U_3 = \sqrt{(K_2 U_2)^2 + U_{ш}^2}, \tag{4.2}$$

где K_2 — коэффициент передачи канала связи.

По аналогии с выражением (4.1) определяется выходное напряжение экспандера U_4 как сигнал на выходе нелинейного четырехполюсника:

$$U_4 = K_3 C_2 (U_3/C_3)^{\beta}, \tag{4.3}$$

где K_3 — постоянный коэффициент передачи экспандера при подаче на его вход напряжения C_3.

Кроме того, $C_3=K_2C_2$, а $C_2=K_1C_1$. Выходное напряжение экспандера определяется как результат воздействия входного сигнала путем подстановки выражений (4.1) и (4.2) в ур-ние (4.3)

$$U_4 = C_3^{1-\beta} K_2^{\beta} K_1^{\beta} C_1^{\beta} (U_1/C_1)^{\alpha,\beta} \left[1 + \frac{U_2}{C_1 K_2 K_1 (U_1/C_1)}\right]^{\beta/2}. \tag{4.4}$$

При разложении правой части ур-ния (4.4) в ряд и исключении членов порядка выше второго (так как по условию анализа шумы в канале много меньше сигнала $U_{ш} \ll U_1\alpha$) получено простое выражение

$$U_4 = AU_1 + q,$$

где A — постоянная величина; AU_1 — полезный сигнал; q — среднеминутное значение шума в тракте с компандированием,

$$\bar{q} = \frac{\beta}{2} \frac{K_3}{K_1 K_2 C_1^{2(1-\alpha)}} \bar{U}_{ш}^2 \left(\frac{1}{U_{ш}^{2(\alpha-1)}}\right).$$

Среднеминутное значение шума в тракте без компандера определено соответственно

$$\bar{n} = \frac{1}{2} \frac{K_3}{K_1 K_2} \bar{U}_{ш}^2 \left(\frac{1}{U_1}\right),$$

где K_3 — коэффициент передачи тракта.

Следовательно, выигрыш от применения компандирования можно оценить ослаблением шума $\eta = \bar{n}/q$

$$\eta = \alpha \frac{(\bar{C}_1/U_1)}{(\bar{C}_1/U_1)^{(2\beta-1)}}. \qquad (4.5)$$

Это выражение показывает, что ослабление шума η является функцией коэффициента регулировки компрессора α и коэффициента регулировки экспандера β, а также зависит от количественных характеристик речи как случайного процесса. Анализ выражения (4.5) приводит к выводу о том, что величина $\alpha = 1/2$ может быть признана оптимальной, так как дальнейшее увеличение сжатия не ведет к существенному росту выигрыша и существенно искажает динамику восстановления звукового сигнала. (Напомним, что в компандере без управления колебания затухания тракта усиливаются экспандером в β раз, и поэтому увеличение сжатия сигнала до постоянного уровня недопустимо.)

При $\alpha = 1/2$ и $\beta = 2$ выигрыш, определенный по выражению (4.5), составляет $\eta_i = 11{,}4$ дБ.

Однако данный вывод относится к идеализированному случаю отсутствия шумов на входе компресора. В реальных системах на входе компрессора присутствует шум абонентской линии, который влияет на выигрыш в помехоустойчивости.

Анализ, выполненный с учетом наличия шума на входе компрессора [96], позволил сделать вывод о целесообразности увеличения степени сжатия. Для количественной оценки выигрыша получено следующее выражение показателя η:

$$\eta = \frac{\bar{n}}{2} = \lg\alpha + 2(\alpha - 1)\lg\frac{\bar{n}}{U_0} + 0{,}868\,\sigma^2\alpha(1-\alpha) + \\ + \lg\left(\frac{1 + 2\alpha\,(U_{1ш}/U_{1c})}{1 + 2\,(U_{1ш}/U_{1c})}\right), \qquad (4.6)$$

где $\bar{U}$ — среднее значение уровня речи, а U_0 — напряжение, равное нулевому уровню; σ^2 — дисперсия уровня речи. Соответственно $U_{1ш}/U_{1c}$ — отношение шум/сигнал на входе компандера. Расчеты по выражению (4.6) приведены в табл. 4.1 и показывают значение

ТАБЛИЦА 4.1

Коэффициент сжатия α	Расчетный выигрыш компандирования при изменении отношения $U_c/U_ш$ на входе		
	6 дБ	10 дБ	20 дБ
1/2	12	13	15,6
1/3	17	18	21
1/4	20	21	23,6
1/5	20,6	21,5	24
1/10	21	22	24,5

выигрыша. Анализ данных в табл. 4.1 показывает, что величина выигрыша η зависит от характеристик речи, как случайного про-

цесса, от коэффициента сжатия и от отношения сигнал/шум на входе компрессора при условии, что отношение сигнал/шум в канале связи велико. Таблица показывает:
величина выигрыша η резко возрастает при увеличении степени сжатия динамического диапазона речевого сигнала до значения $\alpha=1/4$, причем дальнейший рост выигрыша с увеличением сжатия сокращается;

при увеличении отношения сигнал/шум на входе компрессора от 6 до 20 дБ величина выигрыша возрастает на 3,6 дБ при $\alpha\leqslant 1/2$; при увеличении сжатия от $\alpha=1/2$ до $\alpha=1/4$ выигрыш возрастает с 12 до 20 дБ для отношения сигнал/шум на входе — 6 дБ и от 15,6 до 23,6 дБ для отношения сигнал/шум на входе — 20 дБ. Следовательно, в отсутствие шумов на входе компандера выигрыш превысит 20 дБ.

Однако расчетные оценки выигрыша не могут служить окончательным количественным критерием эффективности компандирования. Сопоставление результатов, полученных по выражениям (4.5) и (4.6), исходные положения которых одинаковы, свидетельствуют о расхождении расчетных оценок в случае отсутствия шумов на входе компрессора. Вообще следует подчеркнуть, что количественная оценка выигрыша сильно зависит от критерия оценки. Так, выбрав в качестве критерия заметность шумов в паузе для случая, когда шум в канале равномерный, можно сделать вывод о том, что выигрыш B от применения радиокомпандера определяется отношением полос звукового ΔF и управляющего каналов Δf:

$$B=\Delta F/\Delta f.$$

Действительно, помехи в паузе можно различить только при разрушении управляющего канала, шумовая полоса которого в B раз меньше шумовой полосы звукового канала [65].

Таким образом, выигрыш по мощности, обеспечиваемый стандартным радиокомпандером, составляет 8 раз ($\Delta F=2400$ Гц, $\Delta f=300$ Гц). С учетом перераспределения мощности в паузе выигрыш может увеличиться до значения B^2.

Однако это вовсе не означает, что такой выигрыш может быть реализован во время передачи звуковых сигналов или в каналах с замираниями.

В каналах связи с быстрыми замираниями можно использовать вероятностный метод оценки эффективности радиокомпандера. Приняв за модель звукового компрессированного сигнала случайную последовательность звуковых элементов, минимальная длительность которых ограничена полосой управляющего канала, можно определить максимальную эффективность радиокомпандера при наличии случайных помех и замираний сигнала, некоррелированных между собой.

Максимальная эффективность радиокомпандера определяется вероятностью верного воспроизведения Q вероятного уровня звукового элемента сигнала, минимального по амплитуде огибаю-

щей $P_с$ при наличии шумов, поражающих этот элемент с вероятностью $P_ш$ при одновременном замирании того же элемента, при вероятности замираний $P_з$ $Q = 1 - P_с P_ш P_з = 1 - P$. Вероятность Q характеризует неискаженный прием в самой неблагоприятной ситуации, когда совпадают во времени минимальный сигнал, замирание и помеха.

Наоборот P — вероятность искажений минимального звукового элемента:

$$P = P_с P_ш P_з = \int_0^n W_1(С)\,dC \int_0^\infty W_2(Ш)\,dШ \int_0^n W_з(З)\,dз. \qquad (4.7)$$

Представив значения $P_с$, $P_ш$, $P_з$ соответствующими распределениями, можно оценить количественно эффективность радиокомпандера, причем коэффициент эффективности B можно определить отношением вероятностей искажения звукового элемента в тракте с компандированием $P_{ск}$ и без него $P_с$:

$$B = \frac{P_с P_ш P_з}{P_{ск} P_ш P_з} = \frac{P_с}{P_{ск}}.$$

Таким образом, вероятностный расчет эффективности применения компандера свидетельствует о том, что выигрыш пропорционален сжатию диапазона звуков, поскольку это ведет к усилению неравенства $P_{ск} < P_с$, т. е. вероятность появления элемента звукового сигнала малого уровня уменьшается. Из выражения (4.7) также следует, что вероятность искажений звуков P позволяет определить время ухудшения качества связи $t = PT$ (где T — общее время действия канала с компандированием).

Соответственно можно оценить и предельную надежность канала связи, определяемую коэффициентом исправного действия h (КИД). КИД выражается отношением времени действия канала связи с заданным качеством ко всему времени действия по эксплуатационному расписанию.

Следовательно, $h = (T - t)/T = 1 - t/T$. Коэффициент исправного действия позволяет получить как расчетную оценку качества связи, так и экспериментальные данные, необходимые для нормирования качества связи и функционирования системы автоконтроля качества связи.

Использование параметра КИД исследовано [5] в радиотелеграфии и рекомендуется МККР.

Для применения параметра КИД в практике радиотелефонии необходимо выбрать критерий обобщенной оценки качества компандированных сигналов, разработать измерительные приборы, накопить эксплуатационный опыт, необходимый для нормирования качества связи.

Необходимо отметить, что аналитические расчеты не учитывают физиологических факторов восприятия речи, так как последние недостаточно формализованы. Поэтому «энергетическая» оценка эффективности компандеров должна обязательно прове-

ряться «информационной» оценкой, основанной на субъективно-статистических испытаниях.

Методика расчета разборчивости речи позволяет преобразовать экспериментальные (или расчетные) данные об энергетике сигналов и шумов в канале связи в значение артикуляции (слоговой, словесной, фразовой), т. е. обеспечивает переход от энергетических оценок к информационным [97]. Сущность методики сводится к тому, что экспериментально или расчетом определяется превышение (в децибелах) спектральной интенсивности звукового сигнала над спектральной интенсивностью шума в отдельных частотных полосках телефонного канала, а затем к полученной величине прибавляют табличную величину «формантного превышения». После этого для каждой частотной полоски определяют (по соответствующим графикам) коэффициент уменьшения разборчивости и расчетом находят «формантную разборчивость», по которой можно характеризовать артикуляцию звуков, звукосочетаний слов и фраз.

Данная методика позволяет лишь косвенно судить об эффективности компандирования. Поэтому наиболее верная методика состоит в прямой оценке артикуляции в испытуемом тракте при включении и выключении компандера. Правила проведения субъективно-статистических оценок разборчивости речи регламентируются ГОСТ 16600—72 [101].

В соответствии с ГОСТ существуют пять классов разборчивости речи, передаваемой по трактам радиотелефонной связи. ГОСТ устанавливает нормы качества воспроизведения речи, регламентирует методы артикуляционных изменений и оценки их результатов.

В таблице классов качества 4.2 нормированы наименьшие значения разборчивости звуков или слов [101].

ТАБЛИЦА 4.2

Класс качества	Характеристика класса качества	Нормы разборчивости, %		
		звуков	слов	многосложных слов
I	Понимание передаваемой речи без малейшего напряжения внимания	св. 90	св. 95	св. 98
II	Понимание передаваемой речи без затруднений	св. 85 до 90	св. 92 до 95	св. 94 до 98
III	Понимание передаваемой речи с напряжением внимания без переспросов и повторений	св. 78 до 85	св. 87 до 92	св. 89 до 94
IV	Понимание передаваемой речи с большим напряжением внимания, переспросами и повторениями	св. 60 до 78	св. 62 до 87	св. 70 до 89
V	Полная неразборчивость связного текста (срыв связи)	до 60	до 62	до 70

Разборчивость звуков или слов определяют в процентах как отношение количества правильно принятых звуков или слов к количеству переданных (100 звуков в одной таблице звукосочетаний или 50 слов в одной словесной таблице). Методы артикуляционных измерений также регламентированы [101], поскольку различие в приборах и оборудовании, в подготовке к измерениям и тренировочным измерениям могут привести к погрешностям. Проведение артикуляционных измерений в стационарных и объектовых условиях и обработка результатов измерений также должны соответствовать требованиям ГОСТ.

Среднее значение разборчивости звуков D и среднеквадратическое отклонение σ определяют по формулам

$$\bar{D} = \frac{1}{K} \sum_{1}^{k} D_i,$$

$$\sigma_д = \sqrt{\frac{1}{\kappa - 1} \sum_{i=1}^{k} (D_i - \bar{D})^2},$$

где D_i — разборчивость приема одной таблицы одним слушателем; $\kappa = mn$ — общее число таблиц, принятых всеми m слушателями; n — число переданных таблиц.

Если $|D_i - \bar{D}| \geqslant 3\sigma_D$, то данный результат исключается. Анализ разборчивости компандированной речи показывает (см. рис. 2.12), что «коммерческое» качество радиотелефонного тракта соответствует III классу качества по ГОСТ. Итак, возможна объективная оценка эффективности радиокомпандера по выигрышу в помехоустойчивости, определяемому разностью в отношении сигнал/помеха в тракте с компандером и без него при равной артикуляции, соответствующей данному классу качества. Такая методика оценки эффективности устанавливает однозначную связь между информационным и энергетическим критериями качества связи, обеспечивает получение количественных оценок с учетом требований ГОСТ.

Данный метод пригоден не только в телефонии, но и в вещании, так как речевая информация составляет важную часть вещательных программ.

Несмотря на сложность организации артикуляционных испытаний этот метод позволяет объективно оценивать как полные системы, так и отдельные устройства, входящие в состав систем.

Однако артикуляция не позволяет оценить верность передачи индивидуальных особенностей голоса, что в коммерческой телефонии или в вещании имеет значение не меньшее, чем разборчивость. В этом случае метод артикуляции дополняется методом предпочтений (метод экспертных мнений). Так, для количественной оценки узнаваемости дикторов слушатели должны регистрировать соответствующие артикуляционные таблицы [101], читае-

мые в произвольном порядке знакомыми и незнакомыми дикторами. Тогда коэффициент узнаваемости (вернее, его среднее значение и среднеквадратическое отклонение) может быть определен по аналогии с оценкой параметров разборчивости. Соответственно, при оценке качества трактов или систем с компандированием для передачи вещательных сигналов может использоваться коэффициент предпочтений и среднеквадратическое отклонение. Таким образом, субъективно-статистический метод оценки звуковой информации позволяет количественно оценить качество звуковых систем с учетом слуховой реакции человека на сумму искажений, вносимых аппаратурой компандирования и (или) каналом связи.

К сожалению, субъективно-статистические методы применимы лишь для проведения разовых, эпизодических контрольно-испытательных оценок ввиду присущей им трудоемкости и поэтому могут использоваться лишь на стадии разработки или приемосдаточных испытаний компандерных систем.

Для нормирования качества работы аппаратуры компандирования и каналов связи должны использоваться прямые оценки физических параметров сигналов на входе и выходе компандера и его составных частей — компрессора и экспандера. Поскольку основная функция компандера — уменьшение пик-фактора сигнала в канале связи, очевидно, что эффективность компандирования может измеряться величиной или изменениями пик-фактора в разных точках тракта. Обычно под пик-фактором понимают отношение максимального уровня сигнала к эффективному. Однако удобнее воспользоваться обратной величиной, поскольку в этом случае пик-фактор можно выразить в процентах:

$$П = \frac{(U_п - U)\cdot 100}{U_н} = \left(1 - \frac{U}{U_п}\right)\cdot 100.$$

Таким образом, пик-фактор изменяется от нуля (при равенстве среднего и пикового напряжений, например при клиппировании) до единицы (при неограниченном возрастании редких импульсных всплесков — сигналы, выражаемые Бесселевой функцией). Следовательно, эффективность сжатия сигнала можно определить отношением значений пик-фактора на входе $П_1$ и выходе компрессора $П_2$:

$$\alpha_п = \frac{П_1}{П_2} = \frac{U_{п2}(U_{п1} - \overline{U}_1)}{U_{п1}(U_{п2} - \overline{U}_2)}.$$

Так, например, при величине пик-фактора на входе компрессора $П_1 = 0{,}8$ и значении пик-фактора на выходе $П_2 = 0{,}4$ коэффициент сжатия пик-фактора $\alpha_п = 2$.

Соответственно эффективность расширения диапазона сигнала определяется отношением значений пик-фактора на входе $П_3$ и выходе экспандера $П_4$:

$$\beta_п = \frac{П_3}{П_4} = \frac{U_{п4}(U_{п3} - \overline{U}_3)}{U_{п3}(U_{п4} - \overline{U}_4)}.$$

Поскольку для неискаженного компандирования должно выполняться условие $\alpha_{\text{п}}\beta_{\text{п}}=1$, нарушение этого условия позволяет фиксировать искажения в компрессоре, экспандере или в тракте с компандированием.

Данный критерий оценки эффективности реализуется подобно известному методу оценки качества каналов передачи данных (*PAR*-метод), сущность которого сводится к регистрации отношения пикового (импульсного) напряжения к среднему, полученному в результате двухполупериодного выпрямления испытательного сигнала, который транслируют по каналу связи [102].

Для измерения пик-фактора в течение фиксированного времени регистрируют пиковое и среднее значение звукового сигнала, а затем пиковые и средние значения интегрируются за время элементарного отрезка огибающей. Следовательно, с помощью пикового и квадратичного вольтметров, в принципе, возможно количественно измерить качество тракта с компандированием и оценить уменьшение пик-фактора выходного сигнала по отношению к входному, для компрессора, и соответственно оценить восстановление пик-фактора в выходном сигнале экспандера. Параметры пикового и квадратичного вольтметров должны выбираться с учетом определений пикового и среднего уровней [7]. Пиковый уровень речи и речевого сигнала — уровень, соответствующий среднему эффективному значению звукового давления, напряжения или тока, усредненному в интервалах времени 1/8 с и превышаемому в одном проценте всех таких интервалов. Мгновенный уровень, измеряемый безынерционным прибором, приблизительно на 3 дБ больше величины, определенной выше.

Средний эффективный уровень речи и речевого сигнала — уровень среднего эффективного значения звукового давления, напряжения или тока, измеряемого прибором со временем интегрирования не менее 15 с. Разность между пиковым и средним уровнями речи, выраженная в децибелах, характеризует пик-фактор. Итак, введение в канал связи нового функционального элемента — компандера ставит по-новому традиционную задачу оценки эффективности звукового тракта. Причем возможны различные способы аналитических и экспериментальных оценок. Необходимо лишь иметь в виду, что те или иные расчетные или экспериментальные значения реализуемы лишь в определенных, строго оговоренных, условиях. Кроме того, сами оценки могут проводиться по разным критериям, причем сами по себе эти критерии могут быть как независимыми, так и взаимосвязанными.

Так, например, улучшение загрузки передатчика эквивалентно увеличению его мощности или повышению отношения сигнал/шум на входе приемника и количественно может измеряться отношением пик-факторов сигналов на входе и выходе компрессора. Поскольку средняя мощность звукового сигнала незначительна, то компрессия сигнала до постоянного уровня на входе передатчика эквивалентна десятикратному выигрышу по мощности [10] при качестве речи II класса [101]. Критерием эффективности компан-

дера (или другого речевого модема — ограничителя, вокодера и т. д.) является артикуляция, т. е. отношение верно принятых звуковых образцов к общему числу переданных в испытуемом тракте. Разность значений отношения сигнал/шум при одинаковых значениях артикуляции в трактах с компандером и без него позволяют получить количественную оценку эффективности компандера.

При передаче сигналов вещания возможна оценка эффективности компандеров по критерию заметности шума в паузах. В этом случае фиксируется уровень шумов, заметных на слух в тракте с компандером и без него, причем возможны случаи регистрации шумов на «возникновение» и на «пропадание», приводящие к различным количественным оценкам ввиду наличия эффекта адаптации слухового аппарата. Следовательно, называя ту или иную цифру, оценивающую эффективность компандера (расчетную или экспериментальную) следует обязательно указывать критерий оценки и условия измерения.

Подобное требование существует и в других областях техники связи. Так, нельзя указывать вероятность ошибок в канале связи без указания процента времени работы с данным коэффициентом ошибок. Нельзя также называть нестабильность радиосредств без указания времени функционирования этих средств (например суточная или часовая нестабильность).

4.2. КОМПАНДЕР И ИЗМЕРЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

Введение в телефонный канал дополнительного функционального элемента — компандера — заставляет пересмотреть традиционные методы измерения основных характеристик тракта. Специфика передачи телефонных и вещательных звуковых сигналов в трактах с компандированием определяется тем, что при обратимой нелинейности амплитудных характеристик компрессора и экспандера внутри каждого звукового элемента (например слога) усиление должно оставаться постоянным, поскольку усиление в компандере изменяется со слоговой частотой.

Однако современные методы измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и коэффициента нелинейных искажений (КНИ) не учитывают таких особенностей в передаче сигналов и поэтому при внедрении компандерных систем возникают недоразумения.

Так, например, результаты измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) полного тракта, включающего компандер, и суммарной АЧХ отдельных звеньев тракта не совпадают. Следовательно, необходимо совершенствовать методику измерения АЧХ. Кроме того, современные методы измерений АЧХ и КНИ не обеспечивают автоматизации измерений, поскольку предусматривают выполнение ручных операций по подключению измери-

тельных приборов, снятию показаний, отключению компандеров или других устройств и т. п. Даже использование новейшей техники измерений параметров каналов связи, например сопряженных генераторов качающейся частоты и панорамных индикаторов или спектроскопов, не решает проблемы, так как на время измерений канал должен быть снят с эксплуатации и обслуживаться квалифицированным оператором.

Поэтому необходимо рассмотреть особенности измерения АЧХ и КНИ в трактах с компандированием и разработать соответствующие методы измерения АЧХ и КНИ, обеспечивающие автоматизацию измерений и индикацию состояния сети каналов передачи звуковой информации.

Физической основой для решения подобной задачи является наличие пауз в составе звуковой информации — поочередный разговор телефонных абонентов или паузы во время установления соединения, паузы между фрагментами программы в радиовещании и т. д., а также тот факт, что в системе с управляемым компандированием на приеме всегда известно время паузы (по частоте или уровню управляющего сигнала).

Следовательно, задача сводится к выбору такого вида испытательного сигнала, посредством которого возможны измерения АЧХ и КНИ в эксплуатирующихся трактах с компандированием. Общепринятый способ измерения амплитудно-частотных характеристик телефонных трактов и междугородных каналов подачи программ вещания сводится к поочередной трансляции синусоидальных сигналов разных частот постоянного уровня с передачи на прием и регистрации уровней этих частот на приеме. Такой «одночастотный» метод измерения АЧХ оказывается непригодным для трактов, содержащих компандеры, и для самих компандеров, ввиду специфики передачи сигналов.

Действительно, при неуправляемом компандировании отклонения уровня на входе экспандера определяются неравномерностью АЧХ контролируемого участка (с выхода компрессора до входа экспандера), причем они увеличиваются экспандером на величину, определяемую коэффициентом расширения экспандера. Поскольку неуправляемое экспандирование ведет к увеличению любых флуктуаций затухания в тракте, то происходит увеличение неравномерности АЧХ тракта «компрессор — экспандер» во всем динамическом диапазоне компандирования. Эта особенность ограничивает величину компрессии и исключает возможность проверки АЧХ трактов с включенными компандерами, что является существенным недостатком. Кроме того, искажения АЧХ в компрессоре или экспандере могут возникать из-за нелинейности амплитудно-частотных параметров как в речевом, так и в управляющем трактах, причем соответствующие отклонения могут складываться алгебраически. Следовательно, максимальная деформация АЧХ определяется суммой искажений АЧХ компрессора $\Delta P_к$ и его канала управления $\Delta P_{ук}$, соответственно экспандера $\Delta P_э$ и его канала управления $\Delta P_{уэ}$ с учетом наличия искажений АЧХ в трак-

те «компрессор — экспандер» $\Delta P_т$, а также величины коэффициентов сжатия α и расширения β

$$\Delta P = \alpha(\Delta P_к \pm \Delta P_{ук}) \pm \frac{1}{\beta}(\Delta P_э \pm \Delta P_{уэ} \pm \Delta P_т).$$

Поэтому, чтобы исключить погрешность в измерении АЧХ междугородных каналов связи при включенных компандерах предложен двухчастотный метод измерения АЧХ [103]. Этот метод сводится к трансляции в тракте с включенными компандерами одновременно двух измерительных синусоидальных сигналов одного уровня U_1 и частоты f_1 и второго уровня U_2 и переменной частоты f_2, причем $U_1 \gg U_2$. Сигнал U_1 выполняет функции «электрической блокировки» компандера, т. е. устанавливает компрессор и экспандер в режим усилителя с фиксированным усилением, поскольку условие $U_1 \gg U_2$ позволяет пренебречь искажениями АЧХ цепей управления в компрессоре и экспандере и устранить эффект компандирования. Усиление в компрессоре и экспандере определяется только значением, например U_1, так как на управляющую цепь компрессора или экспандера воздействует лишь суммарное значение распределенных по спектру частотных составляющих сигнала (практически выбирают $U_1 = 10U_2$).

Следовательно, суммарные искажения в испытуемом тракте могут быть определены в соответствии с выражением

$$\Delta P = \Delta P_к \pm \Delta P_т \pm \Delta P_э.$$

Таким образом, изменение напряжения U_2 на входе экспандера из-за неравномерности АЧХ участка тракта между компрессором и экспандером не вызовет дополнительных деформаций АЧХ на выходе экспандера, как при одночастотном способе измерения. С другой стороны, частотные искажения тракта, в том числе искажения, вносимые компандером при изменении частоты f_2, будут характеризоваться изменением значения U_2 на выходе экспандера. Напряжение U_1 подавляется режекторным фильтром, который включается на выходе экспандера, что представляет собой известное неудобство при наличии нескольких переприемов с компандерами в трактах связи.

Что касается трактов с управляемым компандированием, то в них может использоваться и одночастотный метод, который не требует каких-либо переключений в трактах во время измерений. Физической основой такой возможности служит тот факт, что при управляемом компандировании производится компрессирование до постоянного уровня во всем частотном диапазоне, и поэтому управляемый компрессор может рассматриваться как амплитудный корректор АЧХ тракта (хотя АЧХ тракта не меняется). С другой стороны наличие регулятора замираний (неуправляемого компрессора) в тракте перед экспандером не позволяет исключить полностью деформации АЧХ тракта на входе экспандера,

тем более, что сам регулятор может искажать АЧХ. Поэтому деформации АЧХ на участке тракта «компрессор — экспандер» также усиливаются из-за нелинейного усиления экспандера. При управляемом компандировании усиление компрессора и экспандера изменяется со слоговой частотой, оставаясь для каждого слога разным, но постоянным. Следовательно, деформация АЧХ в тракте «компрессор — экспандер» усиливается по-разному, в зависимости от изменения усиления экспандера от слога к слогу. Сказанное иллюстрируется на рис. 4.1. Здесь двухчастотные сигналы (слоги) *А* и *Б* поступают на разные участки амплитудной характеристики экспандера в соответствии с разными сигналами управления U_1 и U_2. Соответственно выходные сигналы экспандера *В* и *Г* изменяются по амплитуде. Однако исходная деформация АЧХ (одинаковая для сигналов *А* и *Б*) оказывается измененной: $\Delta P_А = \Delta P_Б$, но $\Delta P_В < \Delta P_Г$.

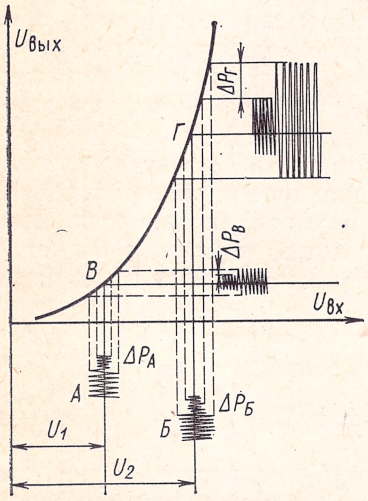


Рис. 4.1. Иллюстрация усиления частотных искажений экспандером

Следовательно, необходим такой метод измерения АЧХ в трактах с управляемым компандированием, который бы позволил исключить эффект усиления деформации АЧХ. Необходимо считаться и с таким эффектом управляемого компандера применительно к анализу АЧХ канала связи одночастотным методом, как эффект «псевдокоррекции» АЧХ компрессором. Дело в том, что управляемый компрессор, усиливая входной одночастотный сигнал до постоянного уровня, может деформировать АЧХ предкомпрессорного тракта, уменьшая неравномерность АЧХ. Следовательно, регистрируя одночастотным методом АЧХ в полном тракте после компрессора, можно получить уменьшенную неравномерность АЧХ, т. е. наблюдать псевдокоррекцию, ибо фактически неравномерность АЧХ не корректируется.

Итак, компрессор уменьшает неравномерность АЧХ, а экспандер увеличивает ее, причем степень увеличения и уменьшения не связаны между собой, поскольку АЧХ на входе компрессора и АЧХ на входе экспандера могут быть различными в зависимости от состояния соответствующих участков тракта.

Уменьшить усиление неравномерности АЧХ экспандером может включенный на его входе регулятор замираний, выполненный в виде неуправляемого компрессора, который должен исключить деформацию АЧХ на входе экспандера за счет псевдокоррекции АЧХ. В этом случае измерение АЧХ полного тракта может быть выполнено одночастотным методом, поскольку в тракте уп-

равления формируется сигнал, отражающий деформацию АЧХ на входе компрессора. Однако для этого сам тракт управления должен иметь идеальную АЧХ, что не всегда гарантируется. Учитывая также, что как одночастотный метод измерения АЧХ, так и двухчастотный сопряжены с ручными операциями, затрудняющими автоматизацию измерений, целесообразно использовать многочастотный метод измерения АЧХ.

При многочастотном методе управляющий сигнал образуется под влиянием суммы сигналов и поэтому влияние АЧХ управляющего канала на звуковой тракт практически исключается. Для формирования многочастотного измерительного сигнала может использоваться фазовая манипуляция синусоидального сигнала, расположенного в центральной части полосы испытуемого канала связи. Для получения спектральных составляющих манипулированного сигнала, заполняющих полосу канала через интервал Δf, необходимо выбрать соответствующую скорость манипуляции. Выбор индекса манипуляции определяется требуемой формой огибающей испытательного сигнала. Так, при необходимости одновременного контроля линейности преобразования динамического диапазона следует выбрать значение скачка фазы $\varphi = 180°$. При этом амплитуда огибающей изменяется от нулевой до максимальной, обеспечивая необходимый динамический диапазон, изменяющийся по стандартному закону, который может быть принят за эталон. На приемной стороне симплексного канала требуется лишь сопоставить выходной сигнал экспандера с имеющимся эталоном, чтобы выявить деформации коэффициента передачи в канале связи. Таким образом могут быть одновременно измерены как амплитудные, так и частотные характеристики тракта связи.

Измерение нелинейных искажений компандированных сигналов также имеет свои особенности. Выбирая в качестве испытательного сигнала многочастотный сигнал, необходимо рассмотреть возможность его использования и для регистрации нелинейных искажений компандерного тракта.

Для отсутствия нелинейных искажений в тракте с компандированием необходимо обеспечить линейность усиления каждого звукового элемента (слога) при обратимой нелинейности амплитудных характеристик компрессора и экспандера, т. е. обеспечить условия, при которых крутизна амплитудной характеристики компрессора $S_к$ была бы обратна крутизне амплитудной характеристики экспандера $S_э$ в любой рабочей точке диапазона компандирования D:

$$S_к = -S_э \quad \text{при} \quad D = D_{макс}.$$

Основными причинами возникновения нелинейных искажений при управляемом компандировании могут быть:

— нарушения линейности усиления внутри слога за счет неточного соответствия статических амплитудных характеристик компрессора и экспандера;

— искажение формы звуковых сигналов из-за погрешности в передаче уровня управляемого сигнала, в результате чего нарушается соответствие рабочих участков амплитудных характеристик компрессора и экспандера;

— нестационарные процессы, возникающие при регулировании и неточном временно́м совмещении звуковых и управляющих сигналов. Следует отметить, что величина возникающих нелинейных искажений изменяется в диапазоне преобразования амплитуд звуковых сигналов в соответствии со значениями $S_к$ и $S_э$ в каждой рабочей точке диапазона компандирования (см. рис. 4.1, где $S_в < S_т$). Следовательно, при одночастотном способе измерения нелинейных искажений необходимо измерять КНИ на разных уровнях, что требует использования ручных операций по повторению измерений, увеличивает время измерений и затрудняет автоматизацию.

Кроме того, одночастотный метод регистрации КНИ имеет тот существенный недостаток, что испытательный сигнал не отражает реальной загрузки звуковых каналов и возникающих при этом искажений.

Действительно, при нелинейных искажениях одночастотного сигнала возникают гармоники, цельнократные по частоте испытательному сигналу, в то время как звуковые сигналы содержат колебания разных частот с нецелочисленным соотношением частот и их гармоник. При воздействии таких многочастотных сигналов на нелинейный элемент тракта возникают не только гармоники сигнальных частот, но и колебаний комбинационных частот. Следовательно, при измерении нелинейных искажений одночастотным методом не обеспечивается контроль нелинейности во всей полосе частот канала. Поэтому в тракте с компандированием целесообразно применять многочастотный метод измерения нелинейных искажений, который позволяет проверить тракт одновременно в разных точках диапазона преобразования амплитуд звуковых сигналов и зафиксировать продукты нелинейности в полной полосе тракта. Временны́е характеристики компандера определяют скорость регулирования усиления или затухания в компрессоре и экспандере так, чтобы регулирование зависело от изменений огибающей звукового сигнала, а не от мгновенного значения амплитуды. Следовательно, при выборе временны́х характеристик в соответствии со слоговой частотой усиление или затухание внутри каждого элемента звукового сигнала (слога) будет постоянным и соответственно, нелинейных искажений не будет. Однако это возможно при полной идентичности временны́х характеристик компрессора и экспандера. При формировании сигнала управления время нарастания огибающей (время установления $\tau_у$) определяется как интервал между моментом времени, когда уровень испытательного сигнала, подаваемого на вход компрессора, увеличивается от номинального значения U_0 и моментом времени, когда огибающая выходного напряжения компрессора в 1,5 раза превышает свое установившееся значение U_0.

Соответственно время восстановления $\tau_в$ определяется как интервал между моментом времени, когда испытательный сигнал начинает уменьшаться от уровня U_0 и моментом времени, когда входное напряжение компрессора достигает 0,75 от установившегося значения U_0. Обычно для телефонных компандеров время установления $\tau_у = \pm 2$ мс, а время восстановления $\tau_в = 20 \pm 5$ мс. В вещательных компандерах постоянные времени выше: $\tau_у \approx \approx 5$—10 мс, а $\tau_в \approx 35$—60 мс [99].

Если время установления и восстановления уменьшено, то могут появиться нелинейные и частотные искажения, возникающие за счет амплитудного ограничения сигналов. Завышенное время установления может вызвать искажение начальной части слога, а увеличение времени восстановления ведет к тому, что между отдельными сигналами не будет внесено необходимое затухание и, следовательно, не будет достигнут эффект ослабления шумов в паузах.

При отклонениях от идентичности временны́х характеристик компрессора и экспандера наблюдаются выбросы, длительность которых определяется разбросом значений $\tau_у$ и $\tau_в$. При управляемом компандировании возникают дополнительные искажения огибающей звука при наличии временны́х сдвигов между сигналами управления и звуковыми сигналами в компрессоре и экспандере. Кроме того, специфика временны́х искажений при управляемом компандировании состоит в том, что их вредное действие в канале связи (перегрузка передатчика за счет выбросов уровня) не может быть обнаружено на выходе управляемого компандера.

Временны́е характеристики тракта с компандированием не меняются в процессе эксплуатации и поэтому их нормирование и контроль важны, в основном, при разработке, испытаниях и профилактике компандерных систем. Однако соблюдение нормированных временны́х параметров, да и само их нормирование невозможно без разработки методики объективной оценки временны́х искажений испытательных тест-сигналов в трактах с компандированием.

Прежде всего следует определить форму самих тестовых сигналов, исходя из физиологических свойств слуха. Поскольку человеческое ухо не различает форму и частоту звука, длительность которого менее 10 мс, длительность испытательного импульса должна быть больше. С другой стороны, разрешающая способность уха при анализе звука, длительность которого превышает 200 мс, снижена, что позволяет выбрать период повторения испытательных импульсов не более 200 мс.

Таким образом, испытательный сигнал для проверки временны́х характеристик может быть выбран в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов длительностью в 20 мс с периодом повторения 200 мс (скважность 1 : 10).

При такой форме испытательного сигнала переходные процессы установления и восстановления могут полностью установиться

и поэтому возможно выявить появление отклонений от нормированных значений, т. е. оценить временны́е искажения в компрессоре, экспандере или в тракте с компандированием.

Естественно, простейшим методом оценки искажений является осциллографический способ визуального сопоставления испытательного сигнала с выходным сигналом компандера, однако этот метод, как указывалось выше, обеспечивает лишь качественную оценку. Количественная оценка может быть дана при измерении в процентах отклонений длительности испытательного импульса δ от номинального значения τ_0:

$$\delta = \left| \frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0} \right| \cdot 100,$$

где τ — длительность испытательного импульса на выходе контролируемого тракта. Ввиду того что искажения первого и второго фронта имеют разные допуски ($\tau_у$ и $\tau_в$ соответственно), их следует регистрировать раздельно.

Итак, отметим, что ступенчатый амплитудноманипулированный тональный сигнал, огибающая которого является последовательностью импульсов, позволяет регламентировать как амплитудные, так и временны́е характеристики тракта с компандированием звуковых сигналов. Для точной оценки амплитудных и временны́х параметров следует использовать специальные измерительные приборы. В соответствии с различными видами измерений, существующих в каналах передачи звуковой информации, приборы — детекторы качества связи делятся на два типа: анализаторы и индикаторы.

Анализаторы предназначены для выполнения исследовательских, настроечных и профилактических измерений, а индикаторы необходимы для предупредительной сигнализации об ухудшении качества связи.

Приборы-анализаторы проектируются с учетом квалифицированного обслуживания и используются обычно для анализа статистических параметров сигналов в условиях трансляции по каналу связи специальных испытательных тест-сигналов. Наоборот, индикаторы качества связи действуют автоматически в условиях эксплуатации канала связи, т. е. без использования тест-сигналов [5].

Возможны, наконец, такие приборы, которые совмещают преимущества анализатора и индикатора, что возможно только при условии простоты таких приборов, ибо обычно анализатор много сложнее индикатора. Анализатор компандированных сигналов должен содержать датчик сигналов и собственно устройства анализа, подключенные к элементам регистрации и накопления данных.

На рис. 4.2 показана структурная схема передающего полукомплекта, состоящая из последовательно включенных генератора *1*, фазового манипулятора *2* и амплитудного манипулятора *3*. Генератор *1* обеспечивает формирование сигналов заданной часто-

ты и стабильности, а также формирование манипулирующих сигналов для манипуляторов *2* и *3*.

Таким образом, с выхода устройства поступает многочастотный двухуровневый сигнал, пригодный для анализа амплитудных, частотных и временны́х характеристик испытуемого тракта, по которому можно оценить АЧХ, КНИ, пик-фактор и другие характеристики компандера или тракта с компандированием.

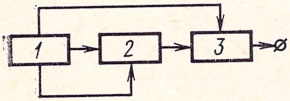


Рис. 4.2. Структурная схема передатчика анализатора

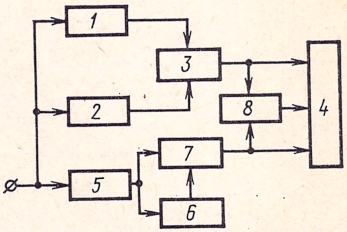


Рис. 4.3. Структурная схема анализатора тракта

Структурная схема приемного полукомплекта — анализатора показана на рис. 4.3. В состав анализатора входят блоки регистрации амплитудных и временны́х характеристик, а для измерения АЧХ и КНИ должны подключаться стандартные измерительные приборы.

Вход анализатора подключается к выходу экспандера или к выходу любого участка тракта с компандированием. Канальный звуковой сигнал поступает на входы пикового *1* и квадратичного *2* детекторов, выходы которых подключены к селектору отношений *3*, позволяющему зафиксировать те случаи, когда пик-фактор превышает установленное значение, которое может регулироваться. Выходной сигнал селектора 3 в виде импульса подается на регистратор *4*, который позволяет накапливать или передавать данные измерений. Для анализа временны́х параметров тракта испытательный сигнал подается на амплитудный детектор *5*, в качестве которого используется типовой детектор огибающей компандера. С выхода этого детектора сигнал подается на формирователь измерительной зоны *6* и селектор сравнения *7*, который выделяет фронт сигнала, искаженного сверх порога, ограниченного измерительной зоной. Выходной сигнал селектора *7* поступает на второй вход регистратора *4*. Поскольку временны́е искажения могут явиться причиной расширения диапазона уровней компрессированных сигналов (выбросы компрессора), то селектор совпадений *8*, включенный между выходами селекторов *7* и *3*, позволяет установить взаимосвязь амплитудных и временны́х искажений.

В качестве прибора индикатора должны использоваться такие детекторы качества сигналов, которые не требуют передачи по каналу связи испытательных сигналов и реагируют на изменение качества информационных сигналов.

Детектор качества должен быть включен в тракт постоянно и сигнализировать об ухудшении качества относительно установленной нормы. Структурная схема индикатора — детектора качества (рис. 4.4) состоит из регистратора замираний *1*, который является пороговым элементом, подключенным к регулирующей цепи регулятора замираний, и детектора огибающей *2*, контролирующего амплитудные флуктуации частотномодулированного сигнала управления. В тех случаях, когда уровень замираний превышает установленный порог, а также при превышении допустимого порога амплитудной модуляции управляющего сигнала, с выхода блоков *1* и *2* поступают соответствующие сигналы на сумматор *3*, выход которого подключен к счетчику импульсов *4*. Этот счетчик отсчитывает импульсы сигнализации и если число импульсов за время замера превышает емкость счетчика, переводит накопитель *4* из исходного состояния в рабочее. Накопитель необходим, поскольку существует вероятность переполнения счетчика *4*. Длительность замера фиксируется таймером *6*. В начале каждого замера счетчик *4* и накопитель *5* устанавливаются в исходное положение периодическими сигналами таймера *6* независимо от заполнения счетчика, чем обеспечивается отсчет в каждом замере заново и исключается сигнализация от редких помех. Поскольку замеры следуют один за другим, детектор качества обеспечивает непрерывный автоконтроль канала связи.

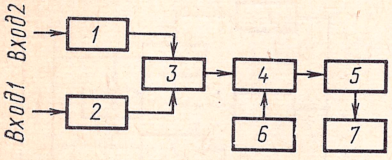


Рис. 4.4. Структурная схема индикатора качества связи

Выходные сигналы накопителя *6* (в случае переполнения счетчика *4* за замер) поступают на сигнализатор *7*, который оповещает оператора или ЭВМ о понижении качества связи. Таким образом, детектор качества может служить датчиком АСУ.

Параметры детектора качества (время замера, емкость счетчика, пороги регистрации уровней) должны определяться из условий нормирования качества связи на трактах разных классов. Так, например, при выборе времени замера $\tau_з = 1$ мин и накопления M замеров за K часов, коэффициент исправного действия η определяется в процентах:

$$\eta = \left(1 - \frac{M}{K60}\right) \cdot 100.$$

Естественно, что $\eta = 100\%$ при отсутствии замеров с пониженным качеством за все $K (M = 0)$ и наоборот $\eta = 0$, когда все замеры — брак $M = K60$.

Можно отметить, что данный детектор качества радиотелефонного тракта подобен регистратору коэффициента исправного действия КИД, используемому в радиотелеграфии [5].

4.3. МОДЕМ УПРАВЛЯЕМОГО КОМПАНДЕРА

Как функциональный элемент радиокомпандера, модем обеспечивает передачу сигналов управления с частотной модуляцией в полосе 2700—3000 Гц. Передача в такой узкой полосе частот аналогового сигнала с большим динамическим диапазоном представляет собой сложную техническую задачу, особенностью которой является обеспечение малых искажений преобразуемых сигналов — необходимо выполнить условия, чтобы изменение частоты на выходе частотного модулятора составляло 2 Гц при изменении уровня на входе детектора огибающей на 1 дБ, и соответственно, чтобы изменение уровня на выходе управляемого экспандера составляло 1 дБ при изменении частоты на входе частотного дискриминатора на 2 Гц при общем диапазоне уровней передаваемых сигналов 60 дБ.

Требования к точности передачи управляющего сигнала возрастают также в связи с наличием рассинхронизации в тракте радиосвязи (нестабильность частот радиопередатчика и радиоприемника и возможно частотные сдвиги в среде распространения). Так, при часовой взаимной нестабильности радиосредств порядка $(1—2)\ 10^{-6}$, «уход» управляющего сигнала на частоте 20 мГц достигает 20—40 Гц. Следовательно, модем управляющего канала должен иметь высокую стабильность модуляционных характеристик, а также иметь возможность работать в условиях рассинхронизации, соизмеримой с девиацией частоты.

Управляющий частотномодулированный сигнал формируется обычно посредством изменения частоты тонального генератора, причем так, что частота обратно пропорциональна приложенному напряжению, которое используется для управления компрессором. Это напряжение предварительно изменяется усилителем постоянного тока по логарифмическому закону. В качестве управляемого генератора иногда используется мультивибратор [54], хотя для поддержания необходимой температурной стабильности требуется прецезионный термостат.

Принципиальная схема управляемого мультивибратора показана на рис. 4.5 и состоит из собственно мультивибратора (T_1, T_2), буферных триодов (T_3 и T_4) и управляющих триодов (T_5, T_6), на которые подается модулирующий сигнал, изменяющий частоту колебаний мультивибратора. При открытом триоде T_1 триод T_2 заперт и конденсатор C_2 заряжается через триод T_6. В это время конденсатор C_1 разряжается через резистор R_1. Диод $Д_1$ при этом заперт. Когда напряжение на C_1 достигает порога отпирания $Д_1$, возникает лавинообразный процесс и мультивибратор T_1, T_2 «опрокидывается» — триоды T_1, T_3 и T_6 запираются, а триоды T_2, T_4 и T_5 отпираются. С помощью входного сигнала переменного уров-

ня изменяется порог срабатывания мультивибратора, т. е. изменяется период релаксации, а следовательно, происходит преобразование «напряжение — частота». Данная схема частотного модулятора аналогична схеме частотного манипулятора, используемого для передачи данных [104]. Однако к манипулятору не предъявляются столь высокие требования линейности модуляционной характеристики и температурной нестабильности.

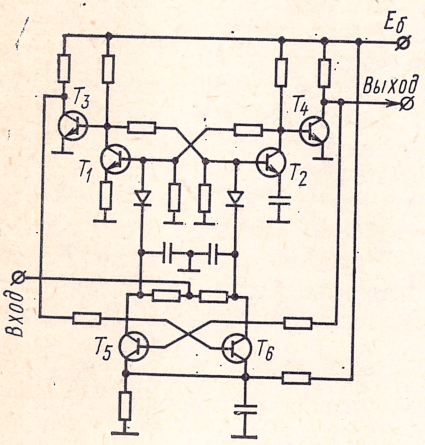


Рис. 4.5. Принципиальная схема управляемого мультивибратора

Для детектирования частотно-модулированных сигналов также может использоваться транзисторный мультивибратор, но работающий в ждущем режиме («ждущий мультивибратор»). Схема триггерного демодулятора показана на рис. 4.6, а временна́я диаграмма его работы приведена на рис. 4.7. Ждущий мультивибратор представляет собой реактивно-спусковую схему, триод T_1 которой в исходном состоянии закрыт, а триод T_2 открыт. При поступлении на вход запускающего импульса триод T_1 отпирается, а трид T_2 запирается, т. е. схема переходит в «рабочее» состояние, в котором находится в течение времени $\tau \approx RC < 1/f_в$, т. е. время держания триггера должно быть несколько меньше периода высшей частоты модуляции. Как видно из диаграммы (рис. 4.7),

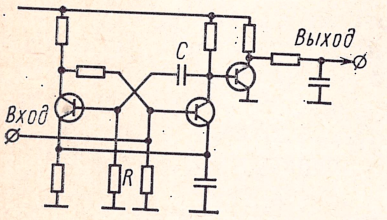


Рис. 4.6. Принципиальная схема частотного детектора

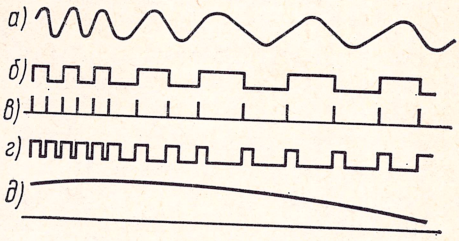


Рис. 4.7. Временна́я диаграмма работы частотного детектора

входной частотномодулированный сигнал (рис. 4.7*а*) ограничивается (рис. 4.7*б*) и его фронты формируются в последовательность импульсов (рис. 4.7*в*). Эти импульсы запускают ждущий мультивибратор (рис. 4.6), с выхода которого следуют импульсы длительностью τ. Интегрируя эти импульсы, можно получить напряжение, амплитуда которого пропорциональна частоте входных сигналов.

Таким образом, простейший модем управляющего канала может быть реализован посредством двух триггеров. Однако кажущаяся простота решения обманчива. Во-первых, даже при стабилизации источников питания и термостатировании времязадающие элементы (реактивные элементы, пороги срабатывания активных элементов) подвержены старению и поэтому изменяют свои временны́е параметры, что ведет к искажению модуляционных характеристик. Во-вторых, сами модуляционные характеристики оказываются нелинейными в нужном диапазоне управления и приходится включать дополнительные сложные активные элементы линеаризации, которые снова приводят к потере стабильности регулирования в модуляторе и демодуляторе. В-третьих, необходим подбор деталей модема и регулировка его параметров во время настройки и эксплуатации аппаратуры, причем для контроля частоты требуется стабильная измерительная аппаратура.

Нетрудно убедиться, что триггерный модем управляющего канала не может обеспечить необходимой стабильности модуляционных характеристик. Даже при нестабильности временны́х параметров модема в 1% (чего добиться непросто) частотная погрешность на частоте 2900 Гц составит почти 30 Гц (или 15 дБ по уровню), что совершенно недопустимо. Перечисленные выше недостатки свойственны и другим аналоговым узкополосным модемам, выполненным по образцу аналоговых частотных манипуляторов, применяемых в тональном телеграфировании [105]. Поэтому в последние годы возрос интерес к дискретным модемам, которые достаточно разработаны для передачи двоичных сигналов [4]. В частности, способ частотного детектирования, показанный на рис. 4.7, может быть реализован с меньшими погрешностями, если заменить ждущий мультивибратор другим, более точным отметчиком времени. В качестве эталона времени может использоваться стабильный высокочастотный генератор со стартстопным делителем частоты. Функциональная схема стартстопного демодулятора с дискретным отсчетом времени (рис. 4.8) содержит последова-

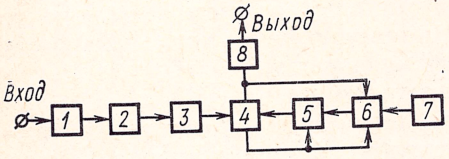


Рис. 4.8. Структурная схема стартстопного демодулятора

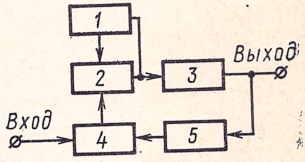


Рис. 4.9. Структурная схема дискретного частотного модулятора

тельно включенные фильтр управляющего канала *1* (выходной сигнал — рис. 4.7*а*), ограничитель *2* (рис. 4.7*б*), формирователь фронтов *3* (рис. 4.7*в*), управляющий (времязадающий) триггер *4*, выполненный в виде реостатно-спусковой схемы с двумя устойчивыми состояниями (рис. 4.7*г*). Триггер *4* запускается фронтом

частотномодулированного сигнала, а сбрасывается по второму входу стартстопным импульсом, сформулированным в цепи стартстопного делителя *5*, управителя *6* и генератора *7*.

Генератор *7* может быть кварцевым и работать непрерывно, а его колебания подаются на стартстопный делитель прерывисто, так как управитель *6* отпирается только в момент пуска триггера *4*. К этому моменту ячейки двоичного делителя *5* должны быть установлены в исходное (нулевое) положение. Таким образом, время «держания» триггера *4* определяется коэффициентом деления n делителя *5*. Значение коэффициента деления n, а также частота генератора *7* зависят от заданной величины погрешности демодуляции. Так, при допустимой погрешности формирование временно́го интервала $\Delta\tau=0{,}01\%$, значение $n=1000$ и делитель должен быть выполнен на десяти двоичных ячейках ($n=2^{10}=1024$). Соответственно частота кварцевого генератора *7* должна быть $f_г=nf_д$, где $f_д$ — частота детектирования.

Итак, с выхода триггера *5* поступает калиброванный по времени импульс, а пауза определяется частотой входного сигнала. Последовательность калиброванных импульсов с меняющейся скважностью (рис. 4.7*г*) интегрируется низкочастотным фильтром *8*, выделяющим детектированное напряжение огибающей (рис. 4.7*д*). Важно отметить, что введя дополнительную обратную связь (цепь *4—6*), т. е. управление числом импульсов, можно реализовать нелинейную демодуляцию, что позволяет исключить антилогарифматор на входе управляемого экспандера.

Наоборот, в случае аналоговых модемов наличие логарифматора и антилогарифматора обязательно. Сопоставив аналоговый и дискретный частотные детекторы (рис. 4.6 и 4.8), нетрудно заметить, что точность детектирования в дискретном варианте практически на порядок выше (погрешность уменьшается с 0,1% до 0,01%). Конечно, соответственно возрастает число элементов, но при современной технологии это не играет решающей роли. Основным достоинством дискретных устройств аналоговой модуляции — детектирования следует считать возможность проектирования трактов по заданной допустимой погрешности, высокую технологичность изготовления и повторяемость функциональных узлов, а также отсутствие органов оперативной регулировки и необслуживаемость в процессе эксплуатации.

Поэтому следует рассмотреть подробнее дискретный модем для передачи управляющих сигналов радиокомпандера. Уместно добавить, что узкополосные модемы необходимы в ряде областей техники связи — в телеметрии, в телеуправлении, в АСУ и т. д. Таким образом, полученные решения представляют интерес не только для реализации аппаратуры с управляемым компандированием, а имеют более широкое применение. Дискретный модем управляемого компандера состоит из дискретного частотного модулятора и дискретного частотного детектора [106]. Принцип действия дискретного частотного модулятора (рис. 4.9) заключается в том, что с целью получения сигналов с высокой стабильностью

частоты и ее девиации используется косвенная автоподстройка высокочастотного неуправляемого стабильного генератора [61]. Задающим генератором модулятора служит кварцевый генератор *1*, с выхода которого снимаются две противофазные последовательности импульсов с частотой $f_г$, которая в n раз выше высшей частоты модулятора $f_в$ ($f_в$ — частота молчания 2960 Гц). Поскольку направление изменения частоты при увеличении уровня на выходе детектора огибающей звуков отрицательное, то уменьшение частоты от значения $f_в$ достигается исключением импульсов частоты $f_г$ с помощью управителя *2*, выполненного в виде селектора совпадений *И*. Управляемый делитель *3* с постоянным коэффициентом деления n обеспечивает на выходе модулятора стабильное напряжение, изменяющееся по частоте от значения $f_в$ до значения $f_н$ ($f_н$ — низшая частота модуляции). Модулирующие сигналы звуковой огибающей поступают на вход модулятора и воздействуют на управляющий вход формирователя широтномодулированных импульсов *4*. Этот формирователь выполняется в виде нуль-органа, формирующего выходной сигнал так, что его длительность пропорциональна (линейно или по другому закону) амплитуде звуковой огибающей. На второй вход формирователя *4* подаются импульсы дискретизации огибающей с частотой $F_м$, причем эти импульсы снимаются с выхода делителя *5*, который может быть заменен автогенератором, так как требование к стабильности частоты дискретизации невысокие. Работа дискретного частотного модулятора происходит в соответствии с временно́й диаграммой, приведенной на рис. 2.16, и поэтому следует остановиться лишь на особенностях расчета модулятора.

По заданным значениям девиации частоты $\Delta F = f_в - f_н$ и допустимой частотной нестабильности $\delta f = \frac{\Delta F}{n}$ определяют значение коэффициента деления частоты $n = \frac{f_в - f_н}{\delta f}$.

Зная коэффициент деления n, легко определить число двоичных ячеек в управляемом делителе $r = \log_2 n$ и вычислить уточненное значение n, которое обеспечивает целое число двоичных ячеек. Затем определяется частота задающего генератора $f_г = nf_в$ и число исключаемых импульсов m, необходимых для обеспечения девиации частоты $\Delta F m = n\delta F$.

Следует подчеркнуть, что закон изменения числа исключаемых импульсов может выбираться в соответствии с необходимой формой модуляционной характеристики «напряжение — частота» и, таким образом, функции логарифматора могут быть выполнены нелинейным модулятором.

Частота дискретизации $F_м$ определяет скорость, с которой формируются группы управляющих импульсов и поэтому она должна выбираться в соответствии с теоремой отсчетов $F_м \geqslant 2/\tau_д$, где $\tau_д$ — постоянная времени детектора огибающей. Практически значение $F_м$ выбирается согласно условию $F_м > 2/\tau_д$.

Экспериментальная проверка стабильности частоты дискретного частотного модулятора при различных климатических воздействиях (проведенная на четырех образцах) показала, что частота не изменяется более чем на ±3—4 Гц в диапазоне температур от +5 до +40° С в диапазоне от +5 до —55 дБ, что недостижимо для аналоговых модуляторов.

Что касается действия дискретного частотного демодулятора, то он может быть выполнен как показано выше (рис. 4.8) и обеспечивать технологические преимущества, свойственные переходу от аналоговой техники к дискретной. Однако использование дискретного демодулятора позволяет обеспечить «системные» преимущества, т. е. улучшить функционирование модема в условиях рассинхронизации, существующих в тракте связи. Дело в том, что параметрические аналоговые узкополосные демодуляторы [105], выполненные в соответствии с методами детектирования сигналов тональной телеграфии, воспринимают абсолютное отклонение частоты ΔF, которое складывается из информационной девиации частоты ΔF и частотной нестабильности тракта δF, т. е. $\Delta F_a = \Delta F \pm \pm \delta f$. Применительно к радиокомпандеру это означает, что значения ΔF и δf могут быть сравнимы по величине, а следовательно, возникают недопустимые искажения звуковой огибающей в процессе преобразования «частота — напряжение». Этот недостаток относится и к дискретному стартстопному детектору (рис. 4.8). Поэтому целесообразна разработка таких дискретных демодуляторов, которые регистрировали бы не абсолютное, а относительное изменение частоты в фиксированные отрезки времени, непрерывно следующие друг за другом. Схема такого «корреляционного» дискретного демодулятора [107] показана на рис. 4.10, а временна́я диаграмма его работы дана на рис. 4.11.

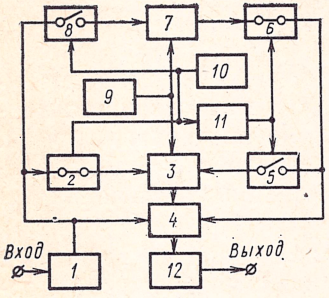


Рис. 4.10. Структурная схема корреляционного частотного демодулятора

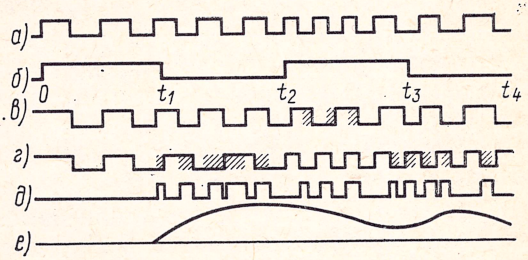


Рис. 4.11. Временна́я диаграмма работы корреляционного демодулятора

Принцип действия корреляционного демодулятора заключается в том, что с целью регистрации изменения набега фазы за интервал $\tau_д = 1/F_м$, вызванного изменением частоты входного сигнала, поочередно отслеживается и запоминается фаза входного колеба-

ния двумя дискретными системами синхронизации (ДСС), обладающими свойством управляемого генератора — отслеживать частоту воздействующего сигнала и свойством высокодобротного резонатора — запоминать фазу воздействующего сигнала на резонансной частоте [4].

Свойство управляемого генератора достигается в результате косвенного управления частотой высокочастотного генератора добавлением — исключением импульсов на входе делителя частоты, а свойство резонатора достигается высокой стабильностью сфазированного предварительно того же неуправляемого генератора.

Изменение набега фазы фиксируется за каждый интервал дискретизации $T_д$, для чего необходимы две дискретные системы синхронизации (ДСС), включаемые поочередно так, чтобы во время фазирования первого синхронизатора второй «помнил» фазовое состояние сигнала за предыдущий интервал $T_д$ [107].

Частотномодулированный сигнал с выхода блока фильтрации и ограничения *1* (рис. 4.11*а*) через нормально замкнутый ключ *2* (ключи *2*, *5* и *8*, *6* выполнены в виде диодных схем *И*) поступает на вход ДСС *3* в течение времени $0—t_1=T_д$, указанного на рис. 4.11*б*. В это время ДСС *3* фазируется, и выходной ключ *5* разомкнут. На вход опорного сигнала фазового детектора *4* синхросигнал от ДСС *3* не поступает, а опорным сигналом является синхросигнал ДСС *7*, который «помнит» результирующую фазу предыдущего интервала $T_д$. Следовательно, фазовый детектор *4* регистрирует набег фазы входного сигнала относительно синхросигнала ДСС *7*. Вход ДСС *7* в интервал $0—t_1$ отключен ключом *8* так, что изменение фазы синхросигнала исключается. Обе ДСС *3* и *7* имеют общий кварцевый генератор *9* и управляются по входам и выходам единым генератором дискретизации *11*. (Этот генератор может быть заменен делителем частоты, включенным, как в частотном модуляторе на рис. 4.9). Ключи коммутации выходов ДСС переключают синхросигналы на вход опорного напряжения фазового детектора *4* (рис. 4.11*в*, *г*) и управляются сигналами с выхода формирователя стробирующих импульсов *11* (рис. 4.11*д*). Эти импульсы имеют длительность $T_с<T_д$. На интервале $t_1—t_3$ фазовым детектором *4* управляет ДСС *3* (ключ *2* разомкнут, ключ *5* замкнут), а ДСС *7* переходит в режим подстройки (ключ *8* замкнут, ключ *6* разомкнут). Далее, на интервале $t_2—t_3$ процесс аналогичен работе демодулятора на интервале $0—t_1$ и т. д. Выходные импульсы фазового детектора *4* (рис. 4.11*е*) сглаживаются фильтром *12*, с которого снимается напряжение звуковой огибающей (рис. 4.11*ж*). Для получения нелинейного закона преобразования «частота — напряжение» может использоваться, например, нелинейный фазовый детектор или дополнительный расширитель выходных импульсов детектора. Анализ принципа функционирования корреляционного дискретного демодулятора показывает, что погрешность детектирования из-за рассинхронизации в тракте определяется только той величиной частотной нестабильности, которая накапливается за интервал под-

стройки каждой ДСС. Поскольку величина периода дискретизации меньше постоянной времени детектора огибающей ($f_д \approx 20$ мс), то понятно, что за столь малое время влияние нестабильности частот пренебрежимо мало. Однако необходимо, чтобы полоса синхронизации ДСС $\Delta F_с$ превышала допустимую величину рассинхронизации в тракте $\Delta F_с \geqslant \Delta F_а = \Delta F \pm \delta f$.

Расширение полосы синхронизации ДСС сверх необходимой величины может снизить помехоустойчивость демодулятора, поэтому целесообразно использовать дополнительную цепь косвенной подстройки частоты генератора *10*, что позволяет исключить влияние рассинхронизации в канале связи без расширения полосы ДСС [4].

Принцип косвенной подстройки заключается в постоянном добавлении или исключении импульсов на входе управляемого делителя ДСС, обеспечивающих сдвиг синхросигналов по частоте в сторону рассинхронизации, существующей в канале связи. Такая косвенная юстировка частоты возможна и в частотном модуляторе. Испытания показали, что косвенная юстировка неуправляемого генератора *10* позволяет увеличить период рассинхронизации в тракте на два порядка, чего не может обеспечить параметрическая подстройка. (Можно отметить, что косвенная подстройка кварцевого генератора не снижает его стабильности.)

Таким образом, с учетом компенсации рассинхронизации в канале связи полоса ДСС может быть ограничена величиной девиации частоты $\Delta f = f_в - f_н$ или, иначе, скорость фазирования ДСС должна соответствовать значению $\tau = 1/(f_в - f_н) \leqslant \tau_д$. Исходя из скорости фазирования, рассчитываются параметры дискретной системы синхронизации [4]. Расчет дискретного синхронизатора в данном случае ведется по заданной девиации частоты ΔF, при которой максимальное время синхронизации $\tau_с < \tau_д = RC$ и достаточно для того, чтобы за $n/2$ шагов подстройки достичь синфазности. Если подстройки производятся с частотой входного сигнала f, где $f_п \leqslant f \leqslant f_в$, то время $\tau_с = n/2f$ или $\Delta F_с = 1/\tau_с = 2f/n$. Следовательно, коэффициент деления делителя синхронизатора $f_г = f_в n$, а число двоичных ячеек в делителе 10. Соответственно частота задающего генератора дискретного демодулятора $f_г = f_в n$.

Наконец, допустимую рассинхронизацию в канале связи можно оценить коэффициентом нестабильности $\kappa f \leqslant 1/n$, а временную погрешность фазирования — значением шага подстройки Δt. Итак, можно сделать вывод о том, что дискретные модемы вполне обеспечивают передачу аналоговых сигналов с высокой точностью.

Естественно, что в тех случаях, когда необходимо передать звуковую огибающую в виде дискретных сигналов, дискретный модем является обязательным. Передача звуковой огибающей посредством двоичных сигналов целесообразна в тех случаях, когда необходимо сократить полосу частот управляемого канала или повысить помехоустойчивость сигналов управления (например за счет регенерации).

При этом необходима дискретизация сигнала, поступающего с выхода детектора огибающей с частотой стробирования, определяемой теоремой В. А. Котельникова. Следовательно, период стробирования $\tau_д \leqslant RC/2$, поскольку для восстановления звуковой огибающей без заметных на слух искажений достаточно обеспечить передачу не менее D уровней. Легко определить необходимую скорость манипуляции $V_к$ при использовании метода ИКМ и фазовой манипуляции с числом градаций фазы $м$

$$V_к \geqslant \frac{\log_2 D}{\tau_0 \log_2 \varphi}.$$

В телефонии достаточно передать не менее восьми уровней огибающей ($D=8$), а при двухкратной фазовой манипуляции $\varphi=4$. Следовательно, скорость манипуляции $V_м=50—100$ Бод в зависимости от выбранного значения $D=8—16$.

4.4. ТЕХНИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕГЛАСНОСТИ СВЯЗИ [1)]

Важной функциональной особенностью передачи радиотелефонных сообщений является необходимость защиты их от прослушивания посторонними лицами, имеющими радиоприемники. Эта необходимость определяется конституционными гарантиями тайны личной корреспонденции, Уставом связи, а также государственными интересами страны.

Хотя методы защиты речевой информации от радиоперехвата здесь не рассматриваются, необходимо кратко охарактеризовать принципы построения устройств, используемых для неразглашения радиотелефонных переговоров, которые рекомендованы МККР [111].

Международная стандартизация методов обеспечения негласности необходима для того, чтобы Администрации связи различных стран могли бы оперативно открывать и эксплуатировать радиотелефонные связи, имея у себя совместимое оборудование преобразования речевых сигналов. Рекомендованные МККР принципы построения устройств обеспечения негласности в аналоговых системах, представленные ниже, используются как в магистральной, так и в местной связи [12, 49, 56, 68, 69]. Так, например, служебные переговоры таких городских учреждений, как милиция, медицинская служба, сберегательные кассы и т. п., должны быть защищены от случайного или намеренного разглашения. Необходимо защитить от прослушивания и коммерческие каналы радиотелефонной связи, поскольку систематический анализ даже личной информации позволяет выявлять важные для государства сведения, не подлежащие разглашению. Поэтому важным функциональным элементом являются устройства обеспечения негласности, состоящие

[1)] Параграф написан по материалам зарубежной печати [12, 48, 49, 56, 68, 69, 108].

из шифратора и дешифратора аналоговых звуковых сигналов — скремблеры [108, 110].

Не обеспечивая стойкости, свойственной дискретным устройствам засекречивания, аналоговые скремблеры защищают речевые сообщения от случайного подслушивания посторонними лицами и затрудняют преднамеренный массовый перехват радиосообщений. Принцип действия аналоговых устройств обеспечения негласности состоит в частотных или временны́х перестановках звуковых элементов по определенному закону шифрования, известному только получателю сообщения. На частотной диаграмме (рис. 4.12) показаны примеры преобразования частотных полос телефонного спектра для снижения разборчивости речи. Простейшим методом является инверсия спектра, при которой исходный сигнал (рис. 4.12*а*) преобразуется так, что низкие частоты меняются местоположением с верхними (рис. 4.12*б*) во время передачи сигнала по каналу связи.

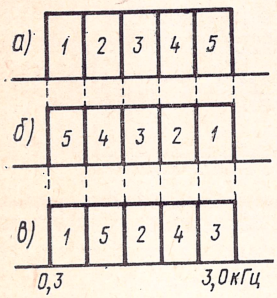


Рис. 4.12. Частотная диаграмма полосного скремблера

Метод инвертирования не обеспечивает эффективной защиты от подслушивания, так как достаточно просто дешифруется. Поэтому данный метод применяется совместно с методом «частотного перемешивания». Принцип действия такого полосного скремблера иллюстрируется рис. 4.12*в*, где звуковой сигнал разделяется полосными фильтрами *1—5* и передается в канал связи после коммутации выходов полосовых фильтров по закону, известному только на приемном конце линии связи. В устройстве, которое разделяет сигнал на κ равных частотных полос, существует $\kappa!$ возможных перестановок и 2^{κ} возможных инверсий, причем оба процесса (перестановка и инверсии) могут быть независимыми. Таким образом, аналоговый скремблер может обеспечить M вариантов частотных комбинаций: $M = 2^{\kappa} \cdot \kappa!$ Однако большинство этих комбинаций не обеспечивает эффекта неразборчивости речи, ввиду большой звуковой и смысловой избыточности речи. Так, при пятиполосном скремблере лишь 12 комбинаций могут обеспечить неразборчивую речь. Эти комбинации должны быстро сменяться (каждую секунду или минуту), хотя при «параллельном» приеме на несколько дешифраторов или при «последовательном» анализе записанной речи прослушивание не вызывает затруднений. Поэтому «частотное перемешивание» речевых сигналов не может служить эффективным средством обеспечения негласности.

Известны временны́е скремблеры [108], основанные на свойстве слуха считать речь разборчивой при наличии эхо-сигналов, задержанных не более чем на 50 мс. При перемешивании временны́х элементов звукового сигнала последний делится на отрезки длительностью от 40 до 80 мс, что соответствует длительности слогов речи. В процессе шифрования происходит изменение естественного

порядка следования элементов речи путем сдвига каждого элемента относительно соседних элементов, что делает шифрованную речь неразборчивой, Дешифровка речи состоит в делении принятого сигнала на звуковые элементы и перестановке их в исходный порядок следования. Поскольку временно́й сдвиг элементов речи мал по сравнению с длительностью фраз, ритм речи не нарушается, так что можно опознать язык и пол абонента.

На рис. 4.13 показана структурная схема временно́го скремблера, состоящего из шифратора и дешифратора с тремя звеньями задержки. Речевой сигнал проходит регистр задержки, состоящий из звеньев *1—3*, с каждого из которых отвод подключается к коммутатору *4*, формирующему выходной сигнал передачи. На приеме дешифратор представляет собой аналогичный регистр, причем сигналы с коммутатора *5* подключаются к соответствующим отводам регистра *6—8*. Естественно, что коммутаторы *4* и *5* должны работать синхронно и по закону, специально выбранному для данного сеанса связи или изменяющемуся во время сеанса связи.

Недостатком временно́го метода является постоянная задержка речи, что затрудняет диалог, а также необходимость в поддержании синхронизма между коммутаторами на передаче и на приеме, что требует передачи специальных сигналов взаимодействия шифратора и дешифратора.

Следует подчеркнуть, что любые аналоговые скремблеры снижают качество речевых сигналов и требуют повышения качества связи. С другой стороны, метод управляемого компандирования выдвигает некоторые специфические требования к технике обеспечения негласности. Дело в том, что аналоговые скремблеры включаются только в звуковой канал, в то время как управляющий канал передается открыто и демаскирует речевой сигнал [48, 56]. Кроме того, изменение временно́го положения звуковых элементов не соответствует изменениям звуковой огибающей, которые транслируются в управляющем канале, что недопустимо

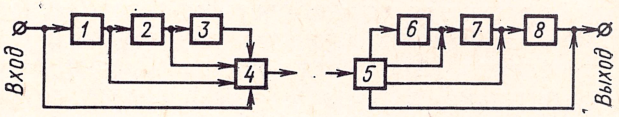


Рис. 4.13. Структурная схема временно́го скремблера

искажает речевой сигнал. Поэтому устройства обеспечения негласности должны включаться на входе и выходе радиокомпандера. Такая схема включения позволяет устанавливать скремблеры непосредственно у абонента, т. е. защищать от подслушивания тракт ввода и вывода сигналов. Кроме того, при таком включении аппаратуры обеспечивается негласность как звукового подканала радиокомпандера, так и подканала управления. В состав структурной схемы радиоканала (рис. 4.14) должны входить шифратор *1* и дешифратор *6*, установленные у абонента, радиоком-

пандер (передатчик *2* и приемник *5*), установленные в радиобюро, и радиосредства (радиопередатчик *3* и радиоприемник *4*). В тех случаях, когда должна обеспечиваться негласность всех переговоров, устройства обеспечения негласности должны устанавливаться совместно с радиокомпандером на одном объекте. Наконец, в

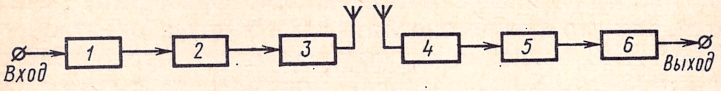


Рис. 4.14. Структурная схема радиокомпандера с обеспечением негласности

подвижной радиосвязи все блоки передачи и приема должны находиться вместе.

При сопряжении скремблера с компандером необходимо обеспечить их сопряжение не только по уровням и другим электрическим параметрам, но обеспечить совместимость временны́х характеристик, т. е. необходимо, чтобы скремблер формировал такой закон изменения огибающей речи, который бы соответствовал временны́м параметрам радиокомпандера, оговоренным в Рекомендации МККР № 455 [68]. Следует подчеркнуть, что обеспечение негласности аналоговых речевых сигналов не обеспечивает их засекречивания, возможного только в дискретном варианте выполнения радиокомпандера.

Итак, сказанное выше позволяет сделать вывод о том, что для разных конкретных условий необходимы различные способы предотвращения потерь информации в каналах связи.

Для массовых коммерческих радиоканалов, а также для связи с подвижными объектами негласность телефонных переговоров может обеспечиваться при включении на входе и выходе радиокомпандера полосно-временно́го скремблера, параметры которого сопряжены с параметрами управляемого компандера.

Прослушивание радиотелефонных переговоров случайными слушателями затрудняется использованием однополосного метода передачи компрессированных сигналов, и устройства негласности зачастую не требуются. При защите радиосообщений от перехвата использование простейших средств негласности неэффективно. Поэтому при ведении переговоров по таким радиоканалам абоненты должны проявлять бдительность и не разглашать сведений, содержащих служебную информацию. При предоставлении радиоканала абоненту последний должен быть предупрежден, что тайна переговоров не гарантируется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шамшин В. А.** Основные направления развития и совершенствования стационарных линий радиосвязи.—«Электросвязь», 1972, № 2, с. 17.

2. **Бухвинер В. Е., Добровольский Е. Е., Пирогов А. А.** О модернизации коротковолновой сети связи.—«Электросвязь», 1972, № 3, с. 5.

3. **Бухвинер В. Е., Дубровский В. А.** Исследование временных искажений сигналов на дальних радиосвязях.—«Радиотехника», 1970, № 4, с. 20.

4. **Бухвинер В. Е.** Дискретные схемы в фазовых системах радиосвязи. М., «Связь», 1969, 125 с.

5. **Бухвинер В. Е.** Оценка качества радиосвязи. М., «Связь», 1974, 225 с.

6. **Пирогов А. А.** и др. Вокодерная телефония. М., «Связь», 1975, 353 с.

7. **Сапожков М. А.** Речевой сигнал в кибернетике и связи. М., Связьиздат, 1962, 452 с.

8. **Deman P.** Circuits téléphoniques sur liaisons de faible qualite». — «L'Onde Electrique», 1961, v. 41, № 7—8, p. 656.

9. **МККР.** Документы XI Пленарной Ассамблеи. Осло, 1966, Том III, М., «Связь», 1969, с. 137.

10. **Бухвинер В. Е., Добровольский Е. Е.** Как повысить надежность работы радиотелефонных линий связи.— «Вестник связи», 1972, № 4, с. 29.

11. **Бухвинер В. Е., Добровольский Е. Е., Рожков М. М.** Управляемое компандирование речевых сигналов в радиотелефонии.— «Электросвязь», 1974, № 1, с. 57.

12. **Бандура Н. В., Бухвинер В. Е., Вандышев В. Б., Добровольский Е. Е.** Радиотелефонные системы связи с управляемым компандированием. Обзорная информация о зарубежной технике связи. Министерство связи СССР, вып. 6, 1970, с. 29.

13. **Верзунов М. В.** Однополосная модуляция в радиосвязи. М., Воениздат. МО СССР, 1972, 295 с.

14. **Frena.** A telephone transmission system for high noise levels. — «Philips Tech. Rev.», 1957—58, v. 19, N 3, p. 73—83.

15. **Петрович Н. Т.** Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. М., «Сов. радио», 1965, 261 с.

16. **Агеев Д. В., Илюхин А. Г.** Устройство для передачи речевых сигналов. Авт. свид. СССР кл. НОЗС 3/00 № 320910 от 12.03.70 оп. 20.01.72.

17. **Чистяков Н. И., Сидоров В. М., Мельников В. С.** Радиоприемные устройства. М., Связьиздат, 1958, 895 с.

18. **Основы** современной системотехники. Под ред. М. Рабина. Перевод с англ. под ред. Е. К. Масловского. М., «Мир», 1975, 534 с.

19. **Джеймс Л., Фланаган.** Анализ, синтез и восприятие речи. Пер. с англ. под ред. А. А. Пирогова. М., «Связь», 1968, 393 с.

20. **Мартынов И. Д., Городилов Ю. С., Заславский Б. С.** Устройство для выделения и преобразования в двоичные импульсы огибающей речевого сигнала. Авт. свид. СССР кл. НО4В 3/02 № 269998, от 19.04.68 оп. 13.08.70.

21. **Бухвинер В. Е., Бандура Н. В.** Система тонального телеграфирования с фазовой манипуляцией.— «Электросвязь», 1969, № 10, с. 38—46.

22. **Гусятинский И. А., Пирогов А. А.** Радиосвязь и радиовещание. М., «Связь», 1974, 173 с.

23. **Бандура Н. В., Бухвинер В. Е., Пирогов А. А.** О перспективных модемах уплотнения радиоканалов.— «Труды НИИР», 1970, № 4, с. 81—87.

24. **Зелях Э. В., Крухмалев В. В.** Об одном способе сжатия спектра речевого сигнала.— «Электросвязь», 1974, № 1, с. 65—68.

25. **ГОСТ** 18664-73. Аппаратура тонального телеграфирования с частотной модуляцией. Основные электрические параметры. М., 1973.

26. **Вакуленко Н. И., Короп Б. В., Марценицен С. И., Степанец В. А., Ярославский Л. И.** Зоновая аппаратура тонального телеграфирования ТТ-12.— «Электросвязь», 1975, № 6, с. 13—19.

27. **Speech** plus Data Equipment GH-1001H. Technical Specification. N T 73/4E. Standard Radio & Telephone AB. A Swedish company of ITT. 1973.

28. **Воронин Н. И.** Автоматизированные системы управления и применение их в хозяйстве связи. М., «Связь», 1974, 46 с.

29. **Красносельский Н. И.** ОАСУ «Связь» — отраслевая автоматизированная система управления хозяйством связи.— «Электросвязь», № 3, 1974, с. 1.

30. **Пирогов А. А.** Синтетическая телефония. М., Связьиздат, 1963, 119 с.

31. **Пирогов А. А.** Гармоническая система сжатия спектров речи.— «Электросвязь», 1959, № 3, с. 8.

32. **Rappaport W.** «Über Messungen der Tonhohenverteilung in der deutschen Sprache. — «Acoustica», 1958, B. 8, N 5, S. 220—225.

33. **Moye L. S.** Digitale Sprachübertragung bei niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten. — «Elektrisches Nachrichtenwesen», 1972, B. 47, N 4, S. 208—219.

34. **Walker John R., Paxton William S.** An all-digital adaptive vocoder. — «Commun. Syst. and Technol. Conf.», Dallas, Texas, 1974. New York, 1974, N 4, S. 75—8.

35. **Куля В. И., Пирогов А. А.** О фонетическом коде речевого сигнала.— «Радиотехника», 1970, № 6, с. 29.

36. **Кучеров В. Я., Гущенков В. В.** Вычислительные системы с речевым ответом. ИНИИТЭИ приборостроения. ТС-3 АСУ, 1973, вып. 9, с. 46.

37. **Угер В. Г.** Современные методы сжатия речи. «Связь за рубежом». (Экспресс-информация). Серия «Телефония, телеграфия, передача данных». ЦНИИС. Москва, вып. 7, 1972, с. 3—31.

38. **Ходатай В. Г.** Возбуждение синтезатора высококачественного полувокодера. Труды НИИР № 2, 1973, с. 44—47.

39. **Назаров В. И., Герастовский П. А.** Прием сигналов с вращающейся фазой при нестабильной тактовой синхронизации.— «Радиотехника», 1972, № 9, с. 12.

40. **Сартасов Н. А., Едвабный В. М., Грибин В. В.** Коротковолновые магистральные радиоприемные устройства. М., «Связь», 1971, 288 с.

41. **Куля В. И.** Экспериментальные исследования корреляционных соотношений в спектре речи и сравнение некоторых вариантов ортогональных вокодеров.— «Электросвязь», 1964, № 4, с. 48—57.

42. **Ивакин В. В., Рудый Л. Н.** Модемы фирмы «Racal»,—«Электросвязь», 1974, № 1, с. 72.

43. **Аппаратура** передачи дискретной информации МС-5 под ред. А. М. Заездного и Ю. Б. Окунева. М., «Связь», 1970, 150 с.

44. **Hauer Werner.** Multiplex Voice and data transmission system. Pat. USA 179—15 (H04j3/00 N 3529088, 2.05.67).

45. **Tomsa Stanley J., Eastmond Bruce C.** In-band data transmission system [Motorola, Inc.]. Pat. USA 179-15BM N 3735048, 28.05.71.

46. **Greefkes I. A.** Inrichting voor in de tijd gecompzimerde of geexpandeerde reproduktie van spraaksignalen. [N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken]. Pat. Holland H04 b 1/66 N 143092; 18.04.64.

47. **Johansson B. E.** Sätt vid överföring av analoga signaler, i synnerhet talsignaler, minska bandbredden jämte anordning för utförande av sättet. (Telefon AB L. M. Ericsson). Pat. Sweden H04 b 1/66 N 349211; 19.12.69.

48. **F. L. Van den Berg,** P. W. L. van Iterson. Transistorized automatic radio telephone terminal type 8RY750. — «Philips Telecommunication Review», 1964, v. 25, N 2, p. 114—122.

49. **Deman P.** Circuits téléphoniques sur liaisons de faible qualite. — «L'Onde Electrique», 1955, N 8—9.

50. **Carter R. O., Wheller L. K.** Lincompex-a system for improving high-frequency Radio-Telephone Circuits. — «British Communications and Electronics». 1965, August, p. 33.

51. **Awcoc R. L. J.** The Lincompex system. — «Point to point telecommunications», 1968, v. 19, N 3. p. 130—142.

52. **Schurig S.** Lincompex, ein neues Überleitverfahren für den Überseesprechfunk auf Kurzwelle. — «Zeitschrift für Post und Fermeldewesen», 1969, B. 212, N 18, S. 698—705.

53. **Накаи Тайитиро, Сато Акира.** Новая система радиотелефонной связи на коротких волнах. «Кокусай Чусин-но КЭНКЮ», 1968, № 51, с. 41—46. Пе-

ревод. Обзорная информация о зарубежной технике связи. Радиосвязь. Минсвязь СССР, 1970, вып. 5., с. 42.

54. **Кимура Масамити, Оцуки Мицуо, Харимото Масахиро, Като Такэси.** Оконечная аппаратура для радиотелефонной связи на коротких волнах с использованием нового принципа передачи сигналов. «Оки дэнки дзико», 1970, 37, № 1, с. 35.

55. **Fraser J. M., Haas H. H., Schachtman M. G.** An improved High-Frequency radiotelephone system featuring constant net loss operation. — «The Bell System Technical Journal», 1967, April, v. 46, N 4, p. 677—720.

56. **F. L. van den Berg.** The Lincompex radio-telephone terminal equipment of the RY741 series. — «Philips Telecommunication Review», 1972, April, v. 30, N 3, p. 45—58.

57. **Beijnink W.** Programme transmission on carrier telephone routes. — «Philips Telecommunication Review», 1968, May, v. 27, p. 135—143.

58. **Drawings Attached.** Signal-transmission system. Pat. u. k. Brit. N 1205728; H4R H04b1(64); 14.05.69.

59. **CCIR** XIII th Plenary Assembly. Geneva, 1974. 3/10IIE, 15.02.74. Report 354-1 (Pev. 74). An improved transmission system for use over HF radiotelephone circuits.

60. **Бухвинер В. Е., Бандура Н. В., Вандышев В. Б., Игнатова Г. П., Пирогов А. А., Реушкина Л. Н., Рожков М. М., Семенова В. И., Шелупаев Г. И.** Оконечная аппаратура каналов радиотелефонной связи с компандированием сигнала речи и подавлением эхо-сигналов. Авт. свид. СССР № 403082 от 4.03.71, опубл. 19.10.73, Бюллетень № 42.

61. **Бухвинер В. Е., Рожков М. М.,** Частотный модулятор. Авт. свид. СССР № 314279 от 05.01.70, опубл. 07.09.71 г. Бюллетень № 27.

62. **Балашова Е. В., Угер В. Г.,** Помехоустойчивость речи при предельном компандировании. «Сборник трудов ЦНИИС» № 1, 1975, с. 102.

63. **Рожков М. М., Сейдер Э. С., Шафер Д. В.** Оконечная аппаратура радиотелефонного канала АРКА.— «Электросвязь», 1974, № 9, с. 26.

64. **Добровольский Е. Е., Шиндин Ю. И.** Управляемый радиокомпандер ВЕТКА.— «Вестник связи», 1975, № 4, с. 49.

65. **Бандура Н. В., Бухвинер В. Е., Добровольский Е. Е.** Управляемые компандеры в радиосвязи и радиовещании.— «Электросвязь», 1974, № 12, с. 37—40.

66. **Ценник** № 116 для переоценки специализированного оборудования предприятий связи, радио и телевидения. М., «Связь», 1970.

67. **Вишневский А. А.** Методика и практика определения эффективности капитальных вложений и новой техники в хозяйстве связи. М., «Связь», 1974, 55 с.

68. **CCJR Recommendation 455 (Rev 72).** Improved transmission system for HF radiotelephone circuits. Dok. 3/1015-E. 15.02.74. Geneva.

69. **Dok.** 3/57 CCIR Study Groups. Period 1970—1974. Improving the perfomance of HF radiotelephone circuits by fetting a Lincompex compandor with an echo cauceller.

70. **Dok.** 3/56. CCIR. Study Group. Period 1970—1974. 14.12.73. Semi-automatic operation.

71. **Йовчев Б. Е., Стоев И. Г., Данчев Ю. И.** Едночестотен тонален приемник. Авт. свид. НРБ кл. 21 а 2, 36/09 № 12616 от 25.04.67, оп. 1.07.70.

72. **Бухвинер В. Е., Рожков М. М., Сейдер Э. С., Шафер Д. В.** Устройство для передачи — приема дискретных сигналов в телефонных каналах связи с управляемым компандированием. Авт. свид. № 506948 от 5.9.72 г. Бюллетень изобретений № 10, 1976.

73. **Бухвинер В. Е., Дубровский В. А., Пащенко С. Е.** Экспериментальная оценка временных искажений разнесенных сигналов в каналах ДЧТ.— «Радиотехника», 1971, № 9, с. 44.

74. **Бухвинер В. Е., Гордеев В. А.** Эффективность радиоприема сигналов ДЧТ при поляризационном разнесении.— «Радиотехника», 1973, № 9, с. 96.

75. **CCIR.** Conclusions of the interim meeting of study group III. Geneva, 1968, p. 114—118. 9—21.10.68.

76. **Бухвинер В. Е., Бандура Н. В.** Дискретная система фазирования разнесенных ФМ сигналов.— «Радиотехника», 1968, № 1, с. 43—50.

77. **Немировский М. С.** Помехоустойчивость радиосвязи. М., «Энергия», 1966, 295 с.

78. **Шамшин В. А.** Самая массовая отрасль радио.— «Электросвязь», № 5, 1975, с. 10.

79. **Добровольский Е. Е.** Основные направления научно-технического прогресса радиосвязи, радиовещания и телевидения. М., «Связь», 1974. 55 с.

80. **Roessler G.** Kurzwellen-Rundfunk. — «Rundfunktechnische Mitteilungen», 1968, N 2, S. 59—79.

81. **Квашнин К. К., Нюренберг В. А., Савватеев В. С.** Обработка сигналов информационного вещания.— «Электросвязь», № 7, 1973, с. 6—8.

82. **Иванов К. В.** Каскадная работа автоматических регуляторов уровня.— «Вестник связи», № 4, 1969, с. 15.

83. **Кодама, Акихино.** Метод обработки звукового сигнала для снижения уровня шумов. Японский пат. 102ВО № 49—37523 от 30.12.70. оп 02.10.74.

84. **Ограничитель** динамики с переносом спектра частот типа ОД-1. Выставка «Связь-75». Павильон ПНР. Москва. (Информационный материал).

85. **Ефимов А. П.** Радиовещание. М., «Связь», № 4, 1975, 310 с.

86. **Пирогов А. А., Аксенов В. Н.** «Способ передачи радиотелефонных сигналов», авт. свид. № 291344, от 14.07.69, оп. 06.01.71. Бюллетень № 3.

87. **Коршунов В. Н.** О передаче данных в паузах телефонного разговора.— «Электросвязь», 1973, № 3. с. 72—73.

88. **Док.** 3/1009-Е 14.02.74. (МККР) CCIR. Recommendation N 246-2 XIIth Plenary Assembly. Geneva, 1974. Study Group 3.

89. **Соловейчик И. Е., Драбкин Р. И., Ярмаркин К. К.** Электронные устройства отображения информации в автоматизированных системах связи. «Связь» М., 1973, 159 с.

90. **Underwood M. J.** Speech recognition. — «Phys. Bull.», 1973.24.May, p. 281—282.

91. **Бухвинер В. Е.** Применение факсимильной техники связи в ОАСУ. В сб. «Проблемы передачи данных в АСУ», конференция НТОРЭС. Киев, 1974, с. 53.

92. **Епифанцев Б. Н.** К вопросу технической реализации идей анализа речи. «Изв. Томского политехнического ин-та», 1972, 194, с. 139—142.

93. **Дж. Н. Холмс.** Говорящие машины. Сб. статей «Человеческие способности машин».— «Сов. радио», 1971, с. 86—102.

94. **Бухвинер В. Е., Драбкин Р. И., Моисеев С. М., Назаров В. И., Соловейчик И. Е.** Система дистанционной передачи и документирования графической информации. Авт. свид. СССР № 515128. Бюллетень № 19, 1976.

95. **Немировский А. С.** Подавление шумов слоговым компандером.— «Электросвязь», 1964, № 8, с. 65—70.

96. **Назарова И. Н.** Исследование и разработка модемов для повышения помехоустойчивости системы морской радиотелефонной связи. Автореферат кандидатской диссертации ЦНИИМФ, Ленинград, 1974, с. 7—10.

97. **Бухвинер В. Е.** Оконечная аппаратура радиотелефонного канала. «Вестник связи». 1975, № 1, с. 49.

98. **Штагер В. В.** Сжиматели — расширители и их применение в технике дальней связи. Связьиздат, 1955, 590 с.

99. **Бандура Н. В., Ходатай В. Г., Шедько В. М.,** Преобразователи динамического диапазона вещательного сигнала. ЦНТИ «Информсвязь». Зарубежная техника связи № 3. (Сер. «Радиосвязь, радиовещание, телевидение»). М., 1974, с. 3.

100. **Шафер Д. В.** Расчет, настройка и испытание транзисторных усилителей с автоматической регулировкой усиления. М., «Связь», 1974. 97 с.

101. ГОСТ **16600—72.** Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Госстандарт, 1973.

102. **Campbell Loran W.** The PAR meter-characteristics of a new voiceband rating system. — «Proc. Nat. Electron. Conf.» Chicago, Ill., 1969, v. 25; Oak. Brook, Ill. 1969, p. 446—451.

103. **Иоффе М. Г., Гольдин Д. М.** Устройство для измерения амплитудно-частотной характеристики каналов связи, содержащих компандерное устройство. Авт. свид. СССР № 326748. Бюллетень № 4, 1972 г.

104. **Панкратов А. Г., Етрухин Н. Н.** Оргсвязь. Техника связи за рубежом. Связьиздат, 1960.

105. **Гуров В. С., Етрухин Н. Н., Рабинович М. Б.** Системы тонального телеграфирования. Техника связи за рубежом. Связьиздат, 1962, 205 с.

106. **Бухвинер В. Е., Пирогов А. А., Рожков М. М.** Дискретный модем с частотной модуляцией для передачи аналоговых сигналов.— «Электросвязь», 1975, № 10.

107. **Пирогов А. А., Бухвинер В. Е., Рожков М. М.** Устройство для приема частотномодулированных колебаний. Авт. свид. СССР № 227404 кл. НОЗв от 20.7.68 г. оп. 25.9.68. Бюллетень № 30.

108. **Засекречивание** речевых сообщений с помощью перемешивания. (Перевод с англ.). ВИНИТИ. «Экспресс-информация». «Передача информации», 1974, № 35, 527 с.

109. **Бухвинер В. Е.** Передача речи и данных в телефонных каналах АСУ.— «Радиотехника», № 7, 1976 г. с. 17—22.

110. **МККР.** Документы XI Пленарной Ассамблеи. Осло. 1966. Т. III. М., «Связь», 1969, с. 27. (Рекомендация 336—1).

111. **De H. Charles Baker.** Аппаратура засекречивания телефонных переговоров.— «Communication neus». Iune, 1972, V. 9, № 6.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 5

1. Методы передачи звуковых сигналов 9

1.1. Передача радиотелефонных сигналов 9
1.2. Амплитудное компандирование звуковых сигналов 16
1.3. Управляемое компандирование 20
1.4. Амплитудное ограничение речи 26
1.5. Квантование речевых сигналов 34
1.6. Частотное ограничение речи 39
1.7. Компандирование частотного диапазона речи 42
1.8. Модемы для передачи вокодерных сигналов 49
1.9. Временное компандирование речи 54
1.10. Классификация методов компандирования 57

2. Техника управляемого компандирования 62

2.1. Технические задачи радиотелефонии 62
2.2. Зарубежные системы с управляемым компандированием 65
2.3. Результаты испытаний радиокомпандеров 81
2.4. Отечественный радиокомпандер АРКА 85
2.5. Технико-экономическая оценка внедрения управляемых компандеров . 101
2.6. Рекомендации МККР в радиотелефонии 106

3. Способы повышения эффективности систем с компандированием . . . 114

3.1. Повышение помехоустойчивости радиотелефонного канала 114
3.2. Разнесенный радиоприем звуковых сигналов 124
3.3. Переприем компандированных сигналов 132
3.4. Повышение помехоустойчивости в радиовещании 135
3.5. Одновременная передача речи и данных в АСУ 147
3.6. Дистанционный ввод речи в человеко-машинных АСУ 156
3.7. Речевой вывод данных в человеко-машинных АСУ 162

4. Функциональные элементы проектирования радиотелефонного канала . 170

4.1. Компандер и оценки помехоустойчивости связи 170
4.2. Компандер и измерения искажений в канале связи 179
4.3. Модем управляемого компандера 189
4.4. Техника обеспечения негласности связи 197
Список литературы 201

ИБ № 562

Вилен Ефимович Бухвинер

УПРАВЛЯЕМОЕ КОМПАНДИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Редактор Л. И. Венгренюк
Художник Н. М. Хромов
Художественный редактор А. И. Моисеев
Технический редактор Г. И. Колосова
Корректор Л. И. Чекрыжова

Сдано в набор 4/IV 1977 г. Подп. в печ. 23/IX 1977 г.
Т-16531 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага тип. № 2 Гарнитура литерат.
Печать высокая 13,0 усл.-печ. л. 15,05 уч.-изд. л. Тираж 5000 экз.
Изд. № 17446 Зак. № 83 Цена 75 коп.
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

СПИСОК

МАГАЗИНОВ — ОПОРНЫХ ПУНКТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «СВЯЗЬ»

1. РСФСР, Йошкар-Ола, Советская, 127, магазин № 1.
2. РСФСР, Куйбышев, ул. Красноармейская, 62, магазин № 16.
3. Ленинград, Невский пр., 28, магазин № 1 «Дом книги».
4. Москва, ш. Энтузиастов, 108/43, магазин № 15.
5. РСФСР, Новосибирск, Красный просп., 60, магазин № 7.
6. Рига, бульвар Падомью, 17, магазин «Гайсма».
7. Ташкент, ул. Усмана Юсупова, 101, магазин № 15.

75 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»